ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р 60.1.2.3— 2021/ ISO/TS 15066:2016

РОБОТЫ И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА

Требования безопасности для роботов, работающих совместно с человеком

(ISO/TS 15066:2016, Robots and robotic devices — Collaborative robots, IDT)

Издание официальное

Москва
Российский институт стандартизации
2021

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 ПОДГОТОВЛЕН Федеральным государственным учреждением «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук» (ИПМ им. М.В. Келдыша РАН) и Факультетом космических исследований Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (ФКИ МГУ имени М.В. Ломоносова) на основе собственного перевода на русский язык англоязычной версии международного документа, указанного в пункте 4

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 141 «Робототехника»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 13 августа 2021 г. № 714-ст

4 Настоящий стандарт идентичен международному документу ISO/TS 15066:2016 «Роботы и робототехнические устройства. Роботы для совместной работы» (ISO/TS 15066:2016 «Robots and robotic devices — Collaborative robots», IDT).

Наименование настоящего стандарта изменено относительно наименования указанного международного документа для приведения в соответствие с ГОСТ Р 1.5—2012 (пункт 3.5).

При применении настоящего стандарта рекомендуется использовать вместо ссылочных международных стандартов соответствующие им национальные и межгосударственные стандарты, сведения о которых приведены в дополнительном приложении ДА

5 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

Правила применения настоящего стандарта установлены в статье 26 Федерального закона от 29 июня 2015 г. № 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации». Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодном (по состоянию на 1 января текущего года) информационном указателе «Национальные стандарты», а официальный текст изменений и поправок — в ежемесячном информационном указателе «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ближайшем выпуске ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет (www.gost.ru)

© ISO, 2016
© Оформление. ФГБУ «РСТ», 2021

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

Содержание

1 Область применения 1
2 Нормативные ссылки 1
3 Термины и определения 2
4 Разработка промышленных робототехнических комплексов для совместной работы с оператором . . 2
4.1 Общие положения 2
4.2 Разработка прикладных систем для совместной работы 3
4.3 Идентификация опасностей и оценка рисков 4
5 Требования к применению робототехнических комплексов для совместной работы 5
5.1 Общие положения 5
5.2 Характеристики системы управления, связанные с безопасностью 5
5.3 Компоновка совместного рабочего пространства 5
5.4 Проектирование совместной работы с роботом 6
5.5 Совместная работа 7
6 Верификация и валидация 16
7 Информация по использованию 16
7.1 Общие положения 16
7.2 Информация, относящаяся к роботам для совместной работы 17
7.3 Описание робототехнического комплекса для совместной работы 17
7.4 Описание прикладной системы для использования на рабочем месте 18
7.5 Описание рабочего задания 18
7.6 Информация, относящаяся к прикладным системам с ограничением мощности и силы 18
Приложение А (справочное) Пределы для квазистатического и кратковременного контактов 19
Приложение ДА (справочное) Сведения о соответствии ссылочных международных стандартов национальным и межгосударственным стандартам 29
Библиография 30

Введение

Стандарты комплекса ГОСТ Р 60 распространяются на роботов и робототехнические устройства. Целью стандартов является повышение интероперабельности роботов и их компонентов, а также снижение затрат на их разработку, производство и обслуживание за счет стандартизации и унификации процессов, интерфейсов и параметров.

Стандарты комплекса ГОСТ Р 60 представляют собой совокупность отдельно издаваемых стандартов. Стандарты данного комплекса относятся к одной из следующих тематических групп: «Общие положения, основные понятия, термины и определения», «Технические и эксплуатационные характеристики», «Безопасность», «Виды и методы испытаний», «Механические интерфейсы», «Электрические интерфейсы», «Коммуникационные интерфейсы», «Методы программирования», «Методы построения траектории движения (навигация)», «Конструктивные элементы». Стандарты любой тематической группы могут относиться как ко всем роботам и робототехническим устройствам, так и к отдельным группам объектов стандартизации — промышленным роботам в целом, промышленным манипуляционным роботам, промышленным транспортным роботам, сервисным роботам в целом, сервисным манипуляционным роботам и сервисным мобильным роботам.

Настоящий стандарт относится к тематической группе «Безопасность» и распространяется на промышленных роботов. Он идентичен международному документу ISO/TS 15066:2016, который разработан Техническим комитетом ТК 299 ИСО «Робототехника».

Задачей разработки робототехнического комплекса, который выполняет работу во взаимодействии с оператором, является желание совместить умение роботов выполнять монотонные повторяющиеся действия с индивидуальными навыками и способностями людей. Человек обладает уникальной способностью находить решения в неопределенных ситуациях; роботы демонстрируют точность, мощность и выносливость.

Для обеспечения безопасности в робототехнические комплексы традиционно исключают доступ оператора в рабочую зону робота, пока робот включен. Поэтому различные операции, требующие вмешательства человека, часто не могут быть автоматизированы с использованием робототехнических комплексов.

Настоящий стандарт представляет собой руководство по организации совместной работы с роботом, когда робототехнический комплекс и люди используют одно и то же рабочее пространство. В совместной работе большое значение приобретают функции обеспечения безопасности, реализуемые системой управления, особенно при контроле таких параметров технологического режима, как скорость и сила.

Для комплексной оценки рисков требуется учет особенностей не только самого робототехнического комплекса, но и среды, в которой он функционирует, т. е. рабочего места. При реализации совместной работы людей и робототехнических комплексов могут быть получены и эргономические преимущества, например обеспечение более удобной позы для работника.

Настоящий стандарт дополняет и уточняет стандарты безопасности промышленных роботов ИСО 10218-1 и ИСО 10218-2, а также дает дополнительные указания по новым функциям оперативного управления робототехническими комплексами для совместного выполнения работы.

Роботы, которые используются в совместных операциях, определяемых настоящим стандартом, должны удовлетворять требованиям ИСО 10218-1, робототехнические комплексы — требованиям ИСО 10218-2.

Примечание — Область использования совместных операций является развивающейся. Поэтому понятия ограничения мощности и силы воздействия робота, указанные в настоящем стандарте, могут быть развиты в будущих редакциях.

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

РОБОТЫ И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА

Требования безопасности для роботов, работающих совместно с человеком

Robots and robotic devices. Safety requirements for robots used in collaborative operations with human operator

Дата введения — 2021—11—01

1 Область применения

Настоящий стандарт определяет требования безопасности для промышленных робототехнических комплексов, предназначенных для совместной работы с оператором, и их рабочей среды, а также дополняет требования и рекомендации по совместным действиям с промышленными роботами, приведенные в ИСО 10218-1 и ИСО 10218-2.

Настоящий стандарт применим к промышленным робототехническим комплексам, соответствующим ИСО 10218-1 и ИСО 10218-2. Настоящий стандарт не распространяется на непромышленные роботы, хотя представленные принципы безопасности могут быть полезны для других областей робототехники.

Примечание — Настоящий стандарт неприменим к робототехническим прикладным комплексам для совместной работы с оператором, разработанным до его публикации.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты [для датированных ссылок применяют только указанное издание ссылочного стандарта, для недатированных — последнее издание (включая все изменения к нему)]:

ISO 10218-1:2011, Robots and robotic devices — Safety requirements for industrial robots — Part 1: Robots (Роботы и робототехнические устройства. Требования безопасности для промышленных роботов. Часть 1. Роботы)

ISO 10218-2:2011, Robots and robotic devices — Safety requirements for industrial robots — Part 2: Robot systems and integration (Роботы и робототехнические устройства. Требования безопасности для промышленных роботов. Часть 2. Робототехнические комплексы и их интеграция)

ISO 12100, Safety of machinery — General principles for design — Risk assessment and risk reduction (Безопасность производственных механизмов. Общие принципы проектирования. Оценка рисков и снижение рисков)

ISO 13850, Safety of machinery — Emergency stop function — Principles for design (Безопасность производственных механизмов. Функция аварийного останова. Принципы проектирования)

ISO 13855, Safety of machinery — Positioning of safeguards with respect to the approach speeds of parts of the human body (Безопасность производственных механизмов. Размещение защитных приспособлений в соответствии со скоростью приближения частей тела человека)

IEC 60204-1, Safety of machinery — Electrical equipment of machines — Part 1: General requirements (Безопасность производственных механизмов. Электрооборудование производственных механизмов. Часть 1. Общие требования)

Издание официальное

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применены термины по ИСО 10218-1, ИСО 10218-2 и ИСО 12100, а также следующие термины с соответствующими определениями:

3.1 **совместная работа** (collaborative operation): Состояние, при котором специально разработанный робототехнический комплекс и оператор работают в совместном рабочем пространстве.

Примечание — Адаптировано из ИСО 10218-1:2011, пункт 3.4.

3.2 **(механическая) мощность** [(mechanical) power]: Механическая скорость выполнения работ и количество энергии, потребляемой за единицу времени при их выполнении.

Примечание — Мощность не связана с номинальной мощностью устройства, например двигателя.

3.3 **совместное рабочее пространство** (collaborative workspace): Пространство в рабочей зоне робота, в котором робототехнический комплекс (включая заготовку) и человек могут выполнять задачи одновременно во время производственной операции.

Примечание 1 — Пример совместного рабочего пространства приведен на рисунке 1.

Примечание 2 — Адаптировано из ИСО 10218-1:2011, пункт 3.5.

3.4 **квазистатический контакт** (quasi-static contact): Контакт между оператором и частью робототехнического комплекса, при котором часть тела оператора может быть зажата между движущейся частью робототехнического комплекса и другой неподвижной или движущейся частью роботизированной ячейки.

3.5 **кратковременный контакт** (transient contact): Контакт между оператором и частью робототехнического комплекса, при котором часть тела оператора не зажата и может быть отведена от движущейся части робототехнического комплекса.

3.6 **защитное разделительное расстояние** (protective separation distance): Кратчайшее допустимое расстояние между любой движущейся опасной частью робототехнического комплекса и любой частью поверхности тела людей, которые находятся в совместном рабочем пространстве

Примечание — Разделительное расстояние может быть фиксированным или переменным.

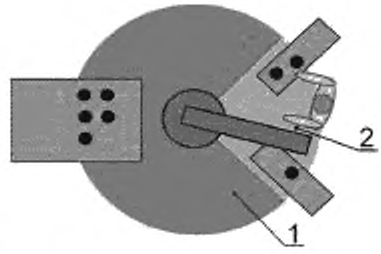
3.7 **модель тела** (body model): Представление человеческого тела в виде отдельных сегментов, характеризующихся соответствующими биомеханическими свойствами.

4 Разработка промышленных робототехнических комплексов для совместной работы с оператором

4.1 Общие положения

ИСО 10218-2:2011 определяет требования безопасности для промышленных роботов и робототехнических комплексов, включая робототехнические комплексы, предназначенные для совместной работы с оператором. Эксплуатационные характеристики таких робототехнических комплексов существенно отличаются от эксплуатационных характеристик традиционных систем робототехнического оборудования, производственных механизмов и другого оборудования. В совместных действиях операторы могут работать в непосредственной близости от робототехнического комплекса, в результате чего в совместной рабочей области может произойти физический контакт между оператором и роботом (см. рисунок 1).

Любая разработка робототехнического комплекса для совместной работы с оператором требует подготовки защитных мер для обеспечения безопасности оператора в течение всего времени работы с роботом. Для выбора надлежащих мер по снижению рисков необходимо провести оценку рисков с целью выявления опасностей и оценку рисков, связанных с применением робототехнического комплекса для совместной работы.



1 — область действия робота, 2 — совместное рабочее пространство

Рисунок 1 — Пример совместного рабочего пространства

4.2 Разработка прикладных систем для совместной работы

Ключевым вопросом в разработке робототехнических комплексов для совместной работы с оператором и связанной с ней компоновкой роботизированной ячейки является устранение опасностей и снижение рисков, что может включать или влиять на проектирование рабочего пространства. Для этого при разработке рабочей среды необходимо учитывать факторы, которые обеспечивают требуемый уровень безопасности:

a) установленные границы (трехмерные) совместного рабочего пространства;

b) совместное рабочее пространство, доступ в него и промежуток безопасности:

1) определение ограниченного пространства и рабочих пространств для совместной работы;

2) факторы, влияющие на форму, положение и размер совместного рабочего пространства (например, хранение материалов, требования к организации работы, наличие препятствий);

3) необходимость в промежутках безопасности вокруг препятствий, таких как арматура, оборудование и строительные опоры;

4) доступность для операторов;

5) предполагаемый(е) и разумно предсказуемый(е) контакт(ы) между частями робототехнического комплекса и оператором;

6) пути доступа (например, осуществляемые операторами маршруты, перемещение материалов в совместное рабочее пространство);

7) опасности, связанные со скольжениями, спотыканиями и падениями (например, кабельные лотки, кабели, неровные поверхности, тележки);

c) эргономика и взаимодействие человека с оборудованием:

1) четкость назначения элементов управления;

2) возможное напряжение, усталость оператора или недостаток концентрации, возникающие в результате совместной работы;

3) ошибки или неправильное использование (преднамеренное или непреднамеренное) оборудования оператором;

4) возможное рефлекторное поведение оператора по отношению к работе робототехнического комплекса и соответствующего оборудования;

5) требуемый уровень подготовки и навыков оператора;

6) допустимые биомеханические ограничения при предполагаемой эксплуатации и при обоснованно прогнозируемом неправильном использовании;

7) потенциальные последствия одиночных или повторяющихся контактов;

d) пределы использования:

1) описание выполняемой работы, включая описание необходимой подготовки и навыков оператора;

2) идентификация лиц (групп), имеющих доступ к совместному рабочему пространству;

3) потенциальные намеренные и непреднамеренные последствия контактов с оборудованием;

4) разрешение доступа только операторам, имеющим допуск;

e) переходы (временные рамки):

1) начало и окончание совместной работы;

2) переход от совместной работы к другим режимам работы.

4.3 Идентификация опасностей и оценка рисков

4.3.1 Общие положения

Интегратор должен провести оценку рисков для совместной работы, как описано в ИСО 10218-2:2011, подраздел 4.3. Следует принимать во внимание потенциально намеренные или обоснованно прогнозируемые ненамеренные ситуации возникновения контакта между оператором и робототехническим комплексом, а также те ситуации, которые могут возникнуть при штатном взаимодействии оператора с оборудованием внутри совместного рабочего пространства.

Пользователь должен участвовать в оценке рисков и разработке рабочего пространства. Интегратор отвечает за обеспечение участия оператора в этой работе и за выбор соответствующих компонентов робототехнического комплекса, руководствуясь требованиями, предъявляемыми к прикладной системе.

4.3.2 Идентификация опасностей

Список существенных опасностей для роботов и робототехнических комплексов, содержащийся в ИСО 10218-2:2011 (приложение А), является результатом идентификации опасностей, выполненной в соответствии с ИСО 12100. Дополнительные опасности для оператора (например, пары, газы, химикаты и горячие материалы) могут создаваться конкретными прикладными системами (например, сваркой, сборкой, шлифованием или фрезерованием). Эти опасности следует учитывать при оценке рисков на этапе проектирования конкретной прикладной системы.

Процесс идентификации опасностей должен учитывать минимум:

a) опасности, связанные с роботом, в том числе:

1) характеристики робота (например, нагрузка, скорость, сила, импульс, крутящий момент, мощность, геометрия, форма поверхности и материал);

2) условия квазистатического контакта с роботом;

3) расположение относительно робота и близость оператора к нему (например, работа под роботом);

b) опасности, связанные с робототехническим комплексом, в том числе:

1) опасности, создаваемые рабочим органом робота и заготовкой, в том числе отсутствие эргономичного дизайна, острые края, потеря заготовки, выступы, работа с устройством смены инструмента;

2) перемещение оператора и его местонахождение и ориентация относительно расположения частей и самих элементов зданий (например, неподвижных конструкций, опор зданий, стен) и опасности, которые представляют предметы, находящихся на них;

3) конструкция креплений, размещение и способ фиксации зажимов, другие связанные с ними опасности;

4) определение того, будет ли контакт кратковременным или квазистатическим и какие части тела оператора могут участвовать в контакте;

5) вид и расположение любого управляемого вручную устройства, задающего движение робота (например, доступность, эргономичность, потенциальное неправильное использование, возможная путаница от контрольных индикаторов и индикаторов состояния и т. д.);

6) учет опасностей, которые создаются окружением (например, защитная крышка удалена из соседней машины, близость лазерной резки);

c) опасности, связанные с конкретным применением, в том числе:

1) опасности, создающиеся технологическим процессом (например, температура, частицы материала, вылетающие в процессе обработки, сварочные брызги);

2) ограничения, вызванные использованием средств индивидуальной защиты;

3) недостатки эргономического дизайна (например, приводящие к потере внимания, неправильной работе).

4.3.3 Документирование заданий

Интегратор путем консультаций с пользователем должен идентифицировать и документировать задачи, связанные с данной роботизированной ячейкой. Должны быть определены все разумно предсказуемые комбинации задач и опасностей. Совместно выполняемые задачи могут характеризоваться следующими факторами:

a) частотой и продолжительностью присутствия оператора в совместном рабочем пространстве с движущимся робототехническим комплексом (например, совместная сборка);

b) частотой и продолжительностью контакта между оператором и робототехническим комплексом, с учетом мощности его приводов или использующихся в прикладном процессе источников энер-

гетической активности (например, физическое взаимодействие с инструментом или заготовкой в процессе ручного управления);

c) переходами между режимами совместного и несовместного выполнений технологических операций;

d) автоматическим или ручным запуском движения робототехнического комплекса после завершения совместной работы;

e) задачами, возникающими при организации одновременной работы нескольких операторов;

f) любыми дополнительными работами, выполняемыми в совместном рабочем пространстве.

4.3.4 Устранение опасностей и снижение рисков

После идентификации опасностей должны быть оценены риски, связанные с робототехническим комплексом для совместной работы, прежде, чем применять меры по снижению рисков. Эти меры основаны на следующих основополагающих принципах, перечисленных в порядке их значимости (см. ИСО 10218-2:2011, пункт 4.1.2):

a) устранение опасностей с использованием конструкции со встроенной безопасностью или снижение их влияния путем замещения;

b) защитные меры, которые не позволяют персоналу получить доступ к опасным ситуациям, контроль опасностей путем приведения их в безопасное состояние (например, остановка работы, ограничение силы, ограничение скорости) до того, как оператор сможет получить доступ или подвергнуться опасностям;

c) предоставление дополнительных защитных мер, таких как информация для использования, обучение, знаки, средства индивидуальной защиты и т. д.

Для традиционных робототехнических комплексов снижение риска обычно достигается за счет решений, которые гарантируют отделение оператора от робототехнического комплекса. При совместной работе снижение рисков главным образом осуществляется с использованием конструкции и надлежащего применения робототехнического комплекса и совместного рабочего пространства. Конкретные меры по снижению рисков для совместной работы определены в разделе 5.

5 Требования к применению робототехнических комплексов для совместной работы

5.1 Общие положения

Робототехнические комплексы, применяемые для совместной работы, должны соответствовать требованиям ИСО 10218-1:2011 и ИСО 10218-2:2011. Содержание настоящего раздела дополняет информацию, приведенную в ИСО 10218-1:2011, подраздел 5.10, и ИСО 10218-2:2011, подраздел 5.11.

5.2 Характеристики системы управления, связанные с безопасностью

Функции системы управления, связанные с безопасностью, должны соответствовать ИСО 10218-1:2011, подраздел 5.4, или ИСО 10218-2:2011, подраздел 5.2.

5.3 Компоновка совместного рабочего пространства

Компоновка совместного рабочего пространства должна быть такой, чтобы оператор мог выполнять все намеченные задачи. Любые риски, связанные с механическим производственным оборудованием или другой техникой, должны быть в достаточной степени уменьшены мерами, определенными при оценке рисков. Расположение оборудования и механизмов не должно создавать дополнительных опасностей. Для задания границ выделенного пространства следует использовать программные ограничения изменения положения степеней подвижности и программно задаваемые оси, ограничивающие перемещения робота, как описано в ИСО 10218-1:2011, пункт 5.12.3.

Риски, связанные с захватом или зажатием всего тела между робототехническим комплексом и, например, частями зданий, сооружений, инженерных сетей, других производственных механизмов и оборудования, должны быть устранены или должно быть организовано безопасное управление ими. В соответствии с ИСО 10218-2:2011 (пункт 5.11.3) должен быть предусмотрен разделительный интервал.

Примечание — Разделительный интервал может изменяться для комплексов, разработанных в соответствии с 5.5.4 и 5.5.5.

Если в совместном рабочем пространстве находится другое производственное оборудование, представляющее опасность, то должны быть приняты защитные меры в соответствии с ИСО 10218-2:2011, пункт 5.11.2. Любые функции, связанные с обеспечением безопасности, должны соответствовать требованиям 5.2.

5.4 Проектирование совместной работы с роботом

5.4.1 Общие положения

Требования к организации совместной работы с роботом установлены в ИСО 10218-2:2011, подраздел 5.11. При планировании совместной работы могут быть использованы методы обеспечения безопасности, определенные в 5.5, как по отдельности, так и в комбинации друг с другом.

При обнаружении любого сбоя в работе подсистемы обеспечения безопасности система управления должна обеспечивать защитную остановку (см. ИСО 10218-2:2011, подпункт 5.3.8.3). Работа не должна быть возобновлена прежде, чем она будет преднамеренно перезапущена оператором из-за пределов совместного пространства..

5.4.2 Защитные меры

Защитные меры должны распространяться на всех лиц, находящихся в совместном рабочем пространстве. Меры безопасности, используемые в совместном рабочем пространстве, должны соответствовать требованиям ИСО 10218-2:2011, подраздел 5.10.

Информация о действующих установках и параметрах безопасности при совместной работе должна быть доступна для просмотра и документирования с использованием уникального идентификатора (например, контрольной суммы) для того, чтобы изменения в конфигурации можно было легко идентифицировать (см. ИСО 10218-1:2011, пункт 5.12.3). Установка и настройка параметров безопасности совместной работы должны быть защищены от несанкционированных и непреднамеренных изменений паролей или аналогичными мерами безопасности.

5.4.3 Функции остановки

Во время совместной работы оператор должен иметь возможность остановить движение робота в любое время одним действием либо для него должна быть предусмотрена возможность беспрепятственного покидания совместного рабочего пространства.

Примеры средств для остановки движения роботов могут включать, но не ограничиваются следующими:

a) деблокирующее устройство;

b) устройство аварийной остановки;

c) остановка робота вручную в случае роботов, которые включают эту функцию.

Количество и расположение устройств аварийной остановки определяют при оценке рисков и должны соответствовать требованиям ИСО 13850.

5.4.4 Переходы между несовместными и совместными операциями

Переходы между методами совместной работы или между несовместной и совместной работой являются особо важными аспектами организации совместной работы. Они должны быть сконструированы таким образом, чтобы робототехнический комплекс не представлял неприемлемых рисков для оператора во время перехода.

Примечание — Для идентификации переходов между совместной и несовместной работой может быть использован визуальный индикатор.

5.4.5 Требования к деблокирующему устройству

ИСО 10218-1:2011 (подраздел 5.8) содержит положения о выносном пульте управления, имеющем деблокирующее устройство (см. ИСО 10218-1:2011, пункт 5.8.3) и функцию аварийной остановки (см. ИСО 10218-1:2011, пункт 5.8.4). Деблокирующее устройство традиционно используют для снижения риска работы с оборудованием. Если при оценивании риска будет найдено решение, которое уменьшает степень риска за счет использования изначально безопасных конструктивных мер или ограничительных функций, тогда допускается использование выносного пульта управления совместной работой робототехнического комплекса без деблокирующего устройства.

Если безопасность совместной работы основана на ограничивающих функциях без использования деблокирующего устройства, то эти функции должны постоянно оставаться активированными. Должны быть установлены безопасные диапазоны изменения показателей, характеризующих прикладной процесс (например, скорость, силу или значения координат степеней подвижности), которые обеспечивают

достаточное снижение риска для программирования, настройки, устранения неполадок, обслуживания и других задач, традиционно выполняемых с использованием деблокирующего устройства.

Всякий раз, когда ограничивающие функции с расчетной безопасностью не активны в заданной конфигурации, робототехнический комплекс для совместной работы должен включать альтернативный метод защиты, такой как деблокирующее устройство, отвечающее требованиям ИСО 10218-1:2011, пункт 5.8.3.

Когда деблокирующее устройство не входит в состав робототехнического комплекса, информация для использования должна включать.

a) уведомление о том, что деблокирующее устройство не включено в состав робота. Если устройство для безопасной контролируемой остановки является опцией, производитель должен предоставить инструкции по установке деблокирующего устройства;

b) отказ от ответственности, указывающий, что робота, не оснащенного деблокирующим устройством, следует использовать только совместно с конструктивными мерами обеспечения безопасности или с активными ограничивающими функциями с расчетной безопасностью.

5.5 Совместная работа

5.5.1 Общие положения

При совместной работе могут быть использованы один или несколько следующих методов:

a) контролируемая остановка с расчетной безопасностью;

b) ручное управление;

c) ограничение скорости и соблюдение защитного расстояния разделения;

d) ограничение мощности и силы.

5.5.2 Контролируемая остановка с расчетной безопасностью

5.5.2.1 Описание

При этом способе работы используются возможности контролируемой остановки робота с расчетной безопасностью, обеспечивающей прекращение движения робота в совместном рабочем пространстве прежде, чем оператор войдет в совместное рабочее пространство для взаимодействия с робототехническим комплексом с целью выполнения задачи (например, для погрузки детали в рабочий орган робота). Если в совместном рабочем пространстве нет оператора, робот может работать в режиме несовместного выполнения операции. Когда робототехнический комплекс находится в совместном рабочем пространстве, срабатывает функция контролируемой остановки с расчетной безопасностью и движение робота прекращается. Оператору разрешается войти в совместное рабочее пространство. Движение робототехнического комплекса может продолжаться без каких-либо дополнительных вмешательств только после выхода оператора из совместного рабочего пространства.

5.5.2.2 Требования к роботу

Для того, чтобы робототехнический комплекс мог быть использован в совместной операции, в которой безопасность обеспечивается путем контролируемой остановки с расчетной безопасностью, он должен удовлетворять следующим требованиям:

a) если движение робота ограничено, то ограничения должны соответствовать ИСО 10218-1:2011, подраздел 5.12;

b) робот должен быть оснащен функцией, обеспечивающей защитную остановку в соответствии с ИСО 10218-1:2011, пункт 5.5.3.

5.5.2.3 Требования к робототехническому комплексу

Действия, выполняемые робототехническим комплексом при обеспечении безопасности с использованием контролируемой остановки с расчетной безопасностью, указаны на рисунке 2. Робототехническому комплексу разрешено перемещаться в совместное рабочее пространство только в том случае, если оператор отсутствует в нем. Если оператора нет в совместном рабочем пространстве, робототехнический комплекс может работать в нем несовместно.



Рисунок 2 — Таблица истинности в операциях с использованием контролируемой остановки с расчетной безопасностью

Совместное рабочее пространство должно устанавливаться с учетом расстояний, которые соответствуют требованиям ИСО 13855. Система управления робота должна быть оборудована устройствами безопасности, которые обнаруживают наличие оператора в совместной рабочем пространстве. Доступ оператора к ограниченному пространству, находящемуся вне совместного рабочего пространства, должен быть предотвращен в соответствии с оценкой рисков.

Если безопасность обеспечивается контролируемой остановкой с расчетной безопасностью, оператор должен иметь доступ к совместному рабочему пространству только при следующих условиях:

a) когда в совместном рабочем пространстве отсутствуют робототехнический комплекс и другие опасности;

b) когда робототехнический комплекс находится в совместном рабочем пространстве и безопасность обеспечивается контролируемой остановкой с расчетной безопасностью (останов категории 2) в соответствии с ИСО 10218-1:2011, подраздел 5.4. Эта функция обеспечения безопасности должна оставаться активированной в течение всего времени, пока оператор находится в совместном рабочем пространстве;

c) когда робототехнический комплекс находится в совместном рабочем пространстве и используется защитная остановка в соответствии с требованиями ИСО 10218-1:2011, подраздел 5.4 и пункт 5.5.3.

При обеспечении безопасности путем использования контролируемой остановки с расчетной безопасностью (остановкой категории 2) робот может замедлиться после инициализации функции, реализованной в соответствии с требованиями МЭК 60204-1.

Когда оператор покидает совместное рабочее пространство, функция контролируемой остановки с расчетной безопасностью может быть отключена и движение робототехнического комплекса может возобновиться автоматически.

Любое условие, нарушающее эти эксплуатационные требования, должно привести к защитной остановке (остановке категории 0) в соответствии с требованиями МЭК 60204-1.

5.5.3 Ручное управление

5.5.3.1 Описание

При этом способе работы оператор использует ручное устройство для передачи команд движения роботу. Перед тем, как оператору будет разрешено войти в совместное рабочее пространство и выполнить задание, требующее ручного управления, робот должен перейти в состояние контролируемой остановки с расчетной безопасностью (см. 5.5.2). Задание выполняется путем ручного управления задающими устройствами, расположенными на или вблизи рабочего органа робота.

Робототехнические комплексы, используемые для ручного управления, могут быть оснащены дополнительными функциями, такими как усилители силы, виртуальные зоны безопасности или трекинг-технологии.

Если в задаче ручного управления выполняются требования 5.5.5, то требования 5.5.3 не применяются.

5.5.3.2 Требования

5.5.3.2.1 Общие положения

У робота должны быть предусмотрены функция контролируемой скорости с расчетной безопасностью (см. ИСО 10218-1:2011, пункт 5.6.4) и функция контролируемой остановки с расчетной безопасностью (см. 5.5.2). Определение ограничения контролируемой скорости с расчетной безопасностью должно осуществляться на основе оценки рисков. Если безопасность оператора зависит от ограничения диапазона перемещений робота, то в роботе должно быть предусмотрено программное ограничение степеней подвижности и пространства с расчетной безопасностью.

Последовательность действий для ручного управления следующая:

a) робототехнический комплекс готов к ручному управлению, когда он входит в совместное рабочее пространство и активирует функцию контролируемой остановки с расчетной безопасностью (см. 5.5.2), оператор может затем войти в совместное рабочее пространство;

b) когда оператор перевел управление робототехнического комплекса на устройство ручного управления, состояние контролируемой остановки с расчетной безопасностью прекращается и оператор выполняет задачу ручного управления;

c) когда оператор освобождает задающее устройство, робототехнический комплекс должен вернуться в состояние контролируемой остановки с расчетной безопасностью (см. 5.5.2);

d) когда оператор вышел из совместного рабочего пространства, робототехнический комплекс может возобновить несовместную работу.

Если оператор входит в рабочее пространство для совместной работы до того, как робототехнический комплекс готов для ручного управления, он должен быть остановлен посредством защитной остановки (см. ИСО 10218-1:2011, пункт 5.5.3).

Доступ в ограниченное пространство вне совместного рабочего пространства должен быть предотвращен в соответствии с оценкой рисков.

5.5.3.2.2 Задающее устройство

Робототехнический комплекс должен быть оснащен задающим устройством, которое обеспечивает возможность активации аварийной остановки (см. ИСО 10218-1:2011, пункты 5.5.2 и 5.8.4), и деблокирующим устройством (см. ИСО 10218-1:2011, пункты 5.8.3), если противное не предусмотрено требованиями 5.4.5, которые позволяют исключить деблокирующее устройство.

Задающее устройство должно быть расположено с учетом следующих требований:

a) обеспечивать возможность оператору находиться вблизи робота, для того чтобы иметь возможность непосредственно наблюдать за движением робота и за любыми опасностями, которые могут возникнуть в результате этого движения (например, путем установки элементов управления на рабочем органе робота);

b) расположение и поза оператора не должны приводить к дополнительным опасностям (например, оператор не находится под действием большой нагрузки или под манипулятором);

c) местоположение оператора должно обеспечивать беспрепятственный просмотр всего совместного рабочего пространства (например, чтобы увидеть дополнительных лиц, входящих в совместное рабочее пространство).

Соответствие осей движения органов управления ручным задающим устройством и осей движения робота должно быть четко обозначенным и легко понятным. Направление осей движения и вращения робота и его рабочего органа должно быть интуитивно понятным и также интуитивно понятно задаваться ручным задающим устройством.

5.5.3.2.3 Переходы между ручным управлением и другими типами выполнения операций

Переходы между работой в режиме ручного управления и несовместной работой или другими видами совместной работы не должны приводить к дополнительным рискам. Оператор должен контролировать такие переходы путем своих действий (например, с использованием деблокирующего устройства) или поведения (например, покидая совместное рабочее пространство).

Конкретными аспектами, которые следует учитывать в этих случаях, являются:

a) переход от ручного управления к контролируемой остановке с расчетной безопасностью (см. 5.5.1), остановка движения робота и контролируемая остановка с расчетной безопасностью не должны приводить к дополнительным опасностям;

b) переходы от контролируемой остановки с расчетной безопасностью на ручное управление не должны приводить к неожиданному движению;

c) при переходе от ручного управления к несовместным действиям все операторы должны выйти из совместного рабочего пространства до того, как робототехнический комплекс сможет продолжить работу в несовместном режиме;

d) переход от несовместной работы к ручному управлению не должен приводить к дополнительным опасностям.

5.5.3.2.4 Оценка рисков

Снижение риска достигается за счет сочетания прямого управления оператором движением робота и соответствующих ограничений с расчетной безопасностью по скорости и положению, определяемыми при оценке рисков. При оценке рисков необходимо отдельно учитывать:

a) контролируемую скорость с расчетной безопасностью, которая позволяет оператору контролировать движения робота и сопутствующие опасности;

b) время и расстояние, которые требуются роботу, чтобы остановиться при освобождении деблокирующего устройства или инициировании защитной остановки, например для подготовки рабочего пространства с учетом местоположения оператора и препятствий;

c) опасности, вызванные заготовкой, рабочим органом робота, периферийными устройствами или прикладными устройствами.

5.5.4 Контроль скорости и разделения

5.5.4.1 Описание

При этом способе работы робототехнический комплекс и оператор могут перемещаться одновременно в совместном рабочем пространстве. Снижение рисков достигается за счет постоянного поддержания защитного расстояния разделения между оператором и роботом. Во время движения робота робототехнический комплекс никогда не приближается к оператору ближе, чем на расстояние защитного разделения. Когда расстояние разделения становится меньше безопасного расстояния, робототехнический комплекс останавливается. Когда оператор удаляется от робототехнического комплекса, он может автоматически возобновить движение в соответствии с требованиями настоящего раздела, поддерживая минимум защитное расстояние разделения, при котором обеспечивается безопасность. Когда робототехнический комплекс уменьшает свою скорость, соответственно уменьшается и расстояние защитного разделения.

5.5.4.2 Требования

5.5.4.2.1 Общие положения

У робота должны быть предусмотрены функция контролируемой скорости с расчетной безопасностью (см. ИСО 10218-1:2011, пункт 5.6.4) и функция контролируемой остановки с расчетной безопасностью (см. 5.5.2). Если безопасность оператора зависит от ограничения диапазона перемещений робота, то в роботе должно быть предусмотрено программное ограничение степеней подвижности и пространства с расчетной безопасностью (см. ИСО 10218-1:2011, пункт 5.12.3). Система контроля скорости и разделения должна соответствовать требованиям 5.2.

Контроль скорости и разделения должен применяться ко всем лицам в совместном рабочем пространстве. Если данная защитная мера имеет ограничение на число лиц, одновременно находящихся в совместном рабочем пространстве, то в информации по использованию должно быть указано максимально допустимое число лиц. Если это максимальное значение превышено, должна произойти защитная остановка.

Если расстояние разделения между опасной частью робототехнического комплекса и любым оператором становится ниже расстояния защитного разделения, то система управления робота должна:

a) инициировать защитную остановку;

b) инициировать функции с расчетной безопасностью, связанные с робототехническим комплексом в соответствии с ИСО 10218-2:2011 (пункт 5.11.2), например выключение всех опасных устройств.

Возможности, с использованием которых система управления роботом может избежать нарушения расстояния защитного разделения, включают (но не ограничиваются):

- снижение скорости возможно с последующим переходом к контролируемой остановке с расчетной безопасностью (см. 5.4.1);

- движение по альтернативному пути, который не нарушает расстояние защитного разделения, при этом продолжая контролировать скорость и разделение.

Когда фактическое расстояние разделения будет равно или станет превышать расстояние защитного разделения, движение робота может быть возобновлено.

5.5.4.2.2 Постоянные и переменные значения скорости и разделения

Максимально допустимые скорости и минимальные расстояния для защитного разделения в прикладной системе могут быть как переменными, так и постоянными. Для переменных значений максимально допустимые скорости и расстояния для защитного разделения могут непрерывно регулироваться в зависимости от относительных скоростей и расстояния между робототехническим комплексом и оператором. Для постоянных значений максимальная допустимая скорость и расстояние защитного разделения определяются путем оценки рисков исходя из наихудших случаев на протяжении всей траектории движения прикладной системы.

Средства для определения относительных скоростей и расстояний между оператором и робототехническим комплексом должны соответствовать требованиям безопасности, содержащимся в ИСО 10218-2:2011, пункт 5.2.2.

5.5.4.2.3 Сохранение достаточного расстояния разделения

Во время автоматической работы опасные части робототехнического комплекса никогда не должны приближаться к оператору ближе, чем на расстояние защитного разделения. Расстояние защитного разделения может быть рассчитано на основе концепций, используемых для создания формулы минимального расстояния в ИСО 13855, модифицированной с учетом следующих опасностей, связанных с контролем скорости и разделения:

a) в ситуациях с установленной постоянной скоростью используется наихудшее значение для контролируемой скорости робота. Это значение зависит от прикладной системы и подтверждается при оценке рисков. Предельное значение скорости должно быть установлено как значение контролируемой скорости, при которой обеспечивается безопасность согласно ИСО 10218-1:2011 (пункт 5.6.4) для того, чтобы гарантировать, что порог ограничения не будет превышен;

b) в ситуациях с переменной скоростью в каждый момент времени скорости движения робототехнического комплекса и оператора используются для того, чтобы определить приемлемое значение расстояния защитного разделения. Управляющая функция для этого должна соответствовать ИСО 10218-2:2011, пункт 5.2.2;

c) дистанция остановки робота определяется в соответствии с ИСО 10218-1:2011, приложение B.

Расстояние защитного разделения S_p может быть рассчитано по формуле

$$S_p(t_0) = S_h + S_r + S_s + C + Z_d + Z_r, \quad (1)$$

где $S_p(t_0)$ — расстояние защитного разделения в момент времени t_0;

t_0 — настоящее или текущее время;

S_h — вклад в расстояние защитного разделения, связанный с изменением местоположения оператора;

S_r — вклад в расстояние защитного разделения, относящийся к времени реакции робототехнического комплекса;

S_s — вклад в расстояние защитного разделения с учетом дистанции остановки робототехнического комплекса;

C — расстояние проникновения (как определено в ИСО 13855), т. е. это расстояние, на которое участок тела может вторгаться в чувствительное поле до его обнаружения;

Z_d — неопределенность положения оператора в совместном рабочем пространстве, измеренная датчиком присутствия, возникающая в результате допусков измерения измерительной системы;

Z_r — неопределенность положения робототехнического комплекса, полученная в результате неточности системы измерения положения робота.

Примечание — $S_p(t_0)$ позволяет рассчитывать расстояние защитного разделения динамически, позволяя изменять скорость робота во время работы прикладного процесса. $S_p(t_0)$ также может быть использовано для вычисления фиксированного значения для расстояния защитного разделения, основываясь на наихудших значениях.

Формула (1) применяется ко всем комбинациям персонала в совместном рабочем пространстве и движущихся частей робототехнического комплекса. Ближайшие части робота и тела человека в совместном рабочем пространстве могут отходить друг от друга, в то время как другие — приближаться друг к другу.

Вклад в расстояние защитного разделения, связанный с изменением местоположения оператора S_h, вычисляют по формуле

$$S_h = \int_{t_0}^{t_0 + T_r + T_s} v_h(t)\,dt, \quad (2)$$

где T_r — время реакции робототехнического комплекса, включая время, необходимое для обнаружения положения оператора, обработки этого сигнала, активации остановки робота, но исключая время, которое требуется роботу для того, чтобы остановиться;

T_s — время остановки робота, от активации команды остановки до тех пор, пока робот не будет остановлен, которое не является постоянным. Оно зависит от конфигурации робота, планового движения, скорости, рабочего органа робота и нагрузки;

v_h — проекция скорости оператора в совместном рабочем пространстве на направление движения части робота, которая может быть положительной или отрицательной в зависимости от того, является ли расстояние разделения увеличивающимся или уменьшающимся;

t — переменная интегрирования в формуле (2) и далее в формулах (4) и (6).

S_h представляет собой вклад в расстояние разделения с учетом движения оператора от текущего момента времени до остановки робота. Здесь v_h является функцией времени и может меняться в силу изменения скорости или направления движения человека. Система обеспечения безопасности должна рассчитываться с учетом таких изменений v_h, которые в наибольшей степени способствуют уменьшению расстояния разделения. Если скорость человека не контролируется, конструкция системы должна предполагать, что v_h составляет 1,6 м/с в направлении, в котором сильнее всего уменьшается расстояние разделения. Согласно ИСО 13855 и спецификации IEC/TS 62046:2008, подпункт 4.4.2.3, v_h может иметь значение, отличное от 1,6 м/с, в зависимости от оценки рисков.

При использовании в расчетах оценки скорости человека 1,6 м/с S_h можно определить по формуле

$$S_h = 1{,}6\ (T_r + T_s). \quad (3)$$

Вклад в расстояние защитного разделения S_r, относящийся ко времени реакции робототехнического комплекса, вычисляют по формуле

$$S_r = \int_{t_0}^{t_0 + T_r} v_r(t)\,dt, \quad (4)$$

где v_r — проекция скорости робота в направлении оператора в совместном рабочем пространстве, которая может быть положительной или отрицательной в зависимости от того, увеличивается или уменьшается расстояние разделения.

S_r представляет собой вклад в расстояние разделения с учетом движения робота относительно человека, входящего в чувствительное поле до того, как система управления активирует функцию остановки. Здесь v_r является функцией времени. Она зависит от скорости и направления движения робота. При проектировании робототехнического комплекса обязательно следует учитывать такие изменения v_r, которые ведут к уменьшению расстояния разделения:

- если скорость робота не контролируется (система должна предполагать, что v_r является максимальной скоростью робота), за v_r принимают максимальное значение скорости робота;
- если скорость робота контролируется, система может использовать текущую скорость робота, и при этом также следует учитывать возможность такого ускорения робота, которое приводит к уменьшению расстояния разделения в наибольшей степени;
- если действует ограничение скорости с расчетной безопасностью, установленное с целью обеспечения безопасности, то в расчетах можно использовать это значение ограничения скорости, при условии, что оно применимо к части рассматриваемого робота.

Примечание — Ограничение скорости с расчетной безопасностью, которое контролирует только скорость центральной точки инструмента в декартовой системе координат, не контролирует другие части робота, ко-

торые могут представлять опасность для оператора. Поэтому может также потребоваться ограничение скорости с расчетной безопасностью, которое контролирует скорости шарниров.

Постоянное значение для S_r можно оценить по формуле

$$S_r = v_r (t_0)\, T_r . \quad (5)$$

Вклад в расстояние защитного разделения, который учитывает путь, проходимый роботом до полной остановки, рассчитывают по формуле

$$S_s = \int_{t_0}^{t_0 + T_r + T_s} v_s (t)\, dt, \quad (6)$$

где v_s — скорость робота на траектории остановки от активации команды остановки до момента остановки робота.

S_s представляет собой вклад в расстояние разделения, обусловленный перемещением робота до момента его остановки. Здесь v_s является функцией времени и может изменяться при изменении скорости или направления движения робота. В расчетах следует учитывать такие возможные изменения v_s, которые приводят к уменьшению расстояния разделения в наибольшей степени:

a) если скорость робота не контролируется, то принимают S_s равной пути торможения в направлении, уменьшающем расстояние разделения в наибольшей степени;

b) если скорость робота контролируется, то может использоваться вычисленный путь торможения робота при этой скорости в направлении, уменьшающем расстояние разделения в наибольшей степени.

Значения для S_s должны быть получены из данных, предоставленных в соответствии с ИСО 10218-1:2011, приложение B.

Различные вклады в защитное разделительное расстояние показаны на рисунке 3. На верхнем графике рисунка 3 скорость оператора по направлению к роботу (v_h) показана как положительное значение, в то время как скорость робота по направлению к оператору (v_r, v_s) показана как отрицательное значение.

Альтернативные реализации разрешены, если они удовлетворяют требованиям 5.5.4.2.

5.5.5 Ограничение мощности и силы

5.5.5.1 Описание

В этом методе совместной работы возможен намеренный либо непреднамеренный физический контакт между робототехническим комплексом (включая заготовку) и оператором. Для совместной работы с ограничением мощности и силы необходимо использовать робототехнические комплексы, специально предназначенные для этого типа работы. Снижение рисков достигается либо использованием в конструкции робота средств со встроенной безопасностью, либо системой управления безопасностью за счет поддержания значений опасностей, связанных с робототехническим комплексом, ниже значений пороговых ограничений, определенных при оценке рисков. Методика определения предельных пороговых значений изложена в приложении A.

5.5.5.2 Ситуации, связанные с возникновением контакта

Во время совместной работы с использованием ограничения мощности и силы контакты между роботом и частями тела оператора могут возникать следующим образом:

a) предусмотренные контактные ситуации, которые являются частью рабочего цикла прикладной системы;

b) случайные контактные ситуации, которые могут быть следствием несоблюдения рабочих процедур, кроме случаев, связанных с техническими сбоями;

c) отказы, которые приводят к ситуациям контакта.

Возможные соприкосновения между движущимися частями робототехнического комплекса и областями на теле человека классифицируются следующим образом:

- квазистатический контакт: ситуации зажимания или придавливания, при которых участок тела человека застревает между движущейся частью робототехнического комплекса и другой неподвижной или движущейся частью рабочей ячейки. В такой ситуации робототехнический комплекс будет применять давление или силу к захваченной части тела в течение некоторого времени до тех пор, пока условие не будет смягчено;

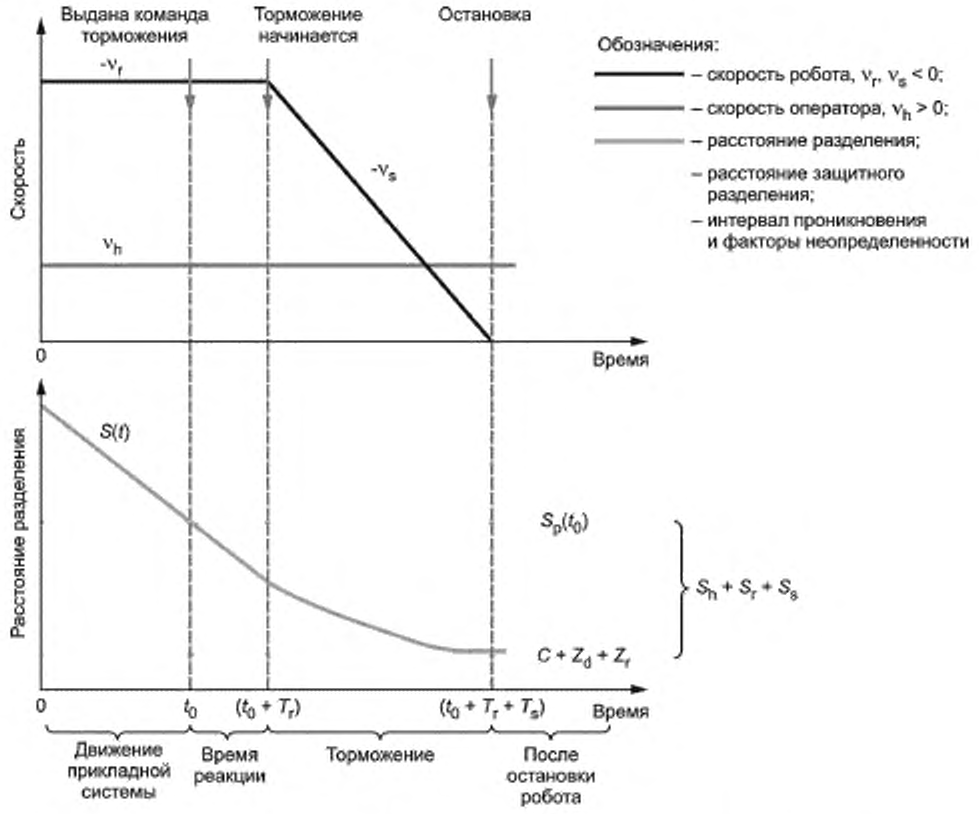


Рисунок 3 — Графическое представление вкладов в защитное расстояние разделения между оператором и роботом

- кратковременный контакт (также называемый «динамическим воздействием»): ситуация, в которой на части тела человека воздействует подвижная часть робототехнического комплекса и части тела могут оттолкнуться или отступить от робота без их зажимания или застревания в месте контакта, тем самым обеспечивая короткое время фактического контакта. Степень воздействия кратковременного контакта на тело человека зависит от сочетания инерции робота (см. примечание 1), инерции части тела человека (см. приложение А) и их относительной скорости.

Примечание 1 — Приведенная инерция робота создается движущейся массой, рассчитанной с учетом места контакта. Контакт может возникнуть в любом месте кинематической цепи (т. е. манипулятора, рычагов, инструментов и заготовки), поэтому для оценки величины инерции используют конкретную позу робота, скорости связи, распределение массы и местоположение контакта или используют наихудшее значение.

Примечание 2 — Инерция частей тела человека рассматривается в справочных документах, перечисленных в разделе «Библиография».

5.5.5.3 Снижение риска потенциального контакта между роботом и оператором

Снижение риска должно опираться на решения, с использованием которых возможный контакт между оператором и робототехническим комплексом не приведет к нанесению вреда оператору. Это достигается путем:

a) выявления условий, в которых такой контакт может иметь место;

b) оценки рискового потенциала таких контактов,

c) проектирования робототехнического комплекса и совместного рабочего пространства с таким расчетом, чтобы такие контакты были нечастыми и избегаемыми;

d) применения мер по снижению рисков, которые обеспечивают тяжесть последствий контактных ситуаций ниже пороговых предельных значений.

При оценке потенциальных опасностей контакта следует исходить из того, что оператор не защищен никакими мерами по снижению рисков, включая средства индивидуальной защиты. Такой подход требует учета следующих особенностей потенциальных контактных событий:

- неприкрытые, т. е. незащищенные области тела оператора;
- причины возникновения контактных событий: преднамеренное действие, как часть предполагаемого использования, либо непреднамеренный контакт или разумно предсказуемое ошибочное использование оборудования;
- вероятность или частота появления;
- тип контакта, т. е. квазистатический или кратковременный;
- зоны контакта, скорости, силы, давления, импульс, механическая мощность, энергия и другие параметры, характеризующие событие физического контакта.

Объекты с острыми, остроконечными, рассекающими или режущими кромками, такими как иглы, ножницы или ножи, а также детали, которые могут причинить вред, не должны присутствовать в зоне контакта.

Примечание 1 — Подходящие корпуса, крышки или разделительные плоскости могут быть использованы для смягчения последствий потенциальных опасностей.

Примечание 2 — Помимо контакта, могут возникнуть другие опасности, в том числе технологические.

Контактное воздействие на чувствительные области тела, включая череп, лоб, гортань, глаза, уши или лицо, должно быть предотвращено, когда это практически осуществимо.

5.5.5.4 Пассивные и активные меры по снижению рисков

Меры по снижению рисков для предотвращения квазистатического и кратковременного контактов являются либо пассивными, либо активными по своей природе. Меры пассивной безопасности учитывают механическую конструкцию робототехнического комплекса, в то время как активные меры проектирования с учетом требований безопасности учитывают возможности управления робототехническим комплексом.

Методы проектирования пассивной безопасности включают (но не ограничиваются):

a) увеличение площади контактной поверхности:
   1) закругленные края и углы;
   2) гладкие поверхности;
   3) податливость поверхностей;
b) поглощение энергии, увеличение времени передачи энергии или уменьшение ударных сил:
   1) прокладка, амортизация;
   2) деформируемые компоненты;
   3) податливость соединений или связей;
c) ограничение движущихся масс.

Способы разработки активной безопасности включают (но не ограничиваются):

- ограничение силы или крутящих моментов;
- ограничение скоростей движущихся частей;
- ограничение импульса, механической мощности или энергии в зависимости от масс и скоростей;
- использование функции программного ограничения степеней подвижности и пространства с расчетной безопасностью;
- использование функции контролируемой остановки с расчетной безопасностью;
- использование датчиков для предупреждения или обнаружения контакта (например, обнаружение близости или контакта для уменьшения квазистатических сил).

Применение этих и других соответствующих мер должно устранить вероятное воздействие на оператора в соответствии с тем, как это определено оценкой рисков.

Примечание — Может потребоваться сочетание функций безопасности. Например, функция безопасности по ограничению силы может быть эффективна только до определенного предела скорости. В этом случае необходима дополнительная функция безопасности по ограничению скорости.

В случае, если одна или несколько пассивных или активных мер по снижению рисков не обеспечивают адекватного их снижения, может потребоваться использование других мер по снижению риска, включая ограждения или защитные средства.

Любое событие зажимания между робототехническим комплексом и областями человеческого тела должно происходить таким образом, чтобы человек мог свободно и легко выйти из условий зажимания.

5.5.5.5 Пределы ограничения мощности и силы

Робототехнический комплекс должен быть спроектирован таким образом, чтобы в достаточной степени уменьшить риски для оператора без превышения пороговых предельных значений для квазистатических и кратковременных контактов при тех же условиях, которые определены в оценке рисков. В приложении А содержится информация о том, как определить пороговые предельные значения.

Роботы, поддерживающие совместную работу с ограничением мощности и силы, могут быть снабжены средствами для настройки предельных пороговых значений, например по силам, крутящим моментам, скоростям, импульсу, механической мощности, диапазонам по степеням подвижности или пространственным диапазонам. Снижение рисков, связанных с кратковременным контактом, может заключаться в ограничении скорости движущихся частей (таких, как робот, оснастка или заготовка) и надлежащего проектирования физических характеристик, таких как площадь поверхности подвижной части, с которой оператор может контактировать. Снижение рисков, связанных с квазистатическим контактом, может включать ограничения скорости и физических характеристик, аналогичные кратковременному контакту, а также проектных характеристик частей робототехнического комплекса, которые делают возможным застревание или зажимание оператора или участка его тела.

Предельные значения для соответствующих случаев контакта с незащищенными участками тела следует оценивать для самых строгих ограничений. Эти «наихудшие» пороговые предельные значения для случаев кратковременных и квазистатических контактов следует использовать при определении надлежащего уровня снижения рисков. Должны быть приняты такие меры или учтены такие особенности конструкции, чтобы последствия возможных контактов оставались ниже этих пороговых предельных значений.

Если движение робота может привести к зажиманию или захвату участка тела оператора между частью робота и другим элементом роботизированной ячейки, скорость робота должна быть такой, чтобы робототехнический комплекс не нарушал защитные ограничения, связанные с незащищенными участками тела, как показано на рисунке 4. Робот также должен быть оснащен средствами, позволяющими оператору самостоятельно освободить зажатый участок тела.

Эргономические пределы могут отличаться от биомеханических пределов. Для частых контактов или других особых случаев применимые пороговые предельные значения могут быть дополнительно уменьшены до эргономически приемлемого уровня.

5.5.5.6 Ограничение скорости

Чтобы снизить риск, связанный с кратковременными контактами, у робототехнического комплекса должны быть ограничены скорости перемещения его подвижных частей. Пределы скорости зависят от инерции (массы) и минимального размера области робота, которая может соприкасаться с неприкрытым участком тела. Руководство по определению пределов скорости представлено в приложении А.

6 Верификация и валидация

Требования по верификации и валидации установлены в ИСО 10218-2:2011, раздел 6.

7 Информация по использованию

7.1 Общие положения

Требования к информации по использованию установлены в ИСО 10218-1:2011 (раздел 7) и в ИСО 10218-2:2011 (раздел 7).

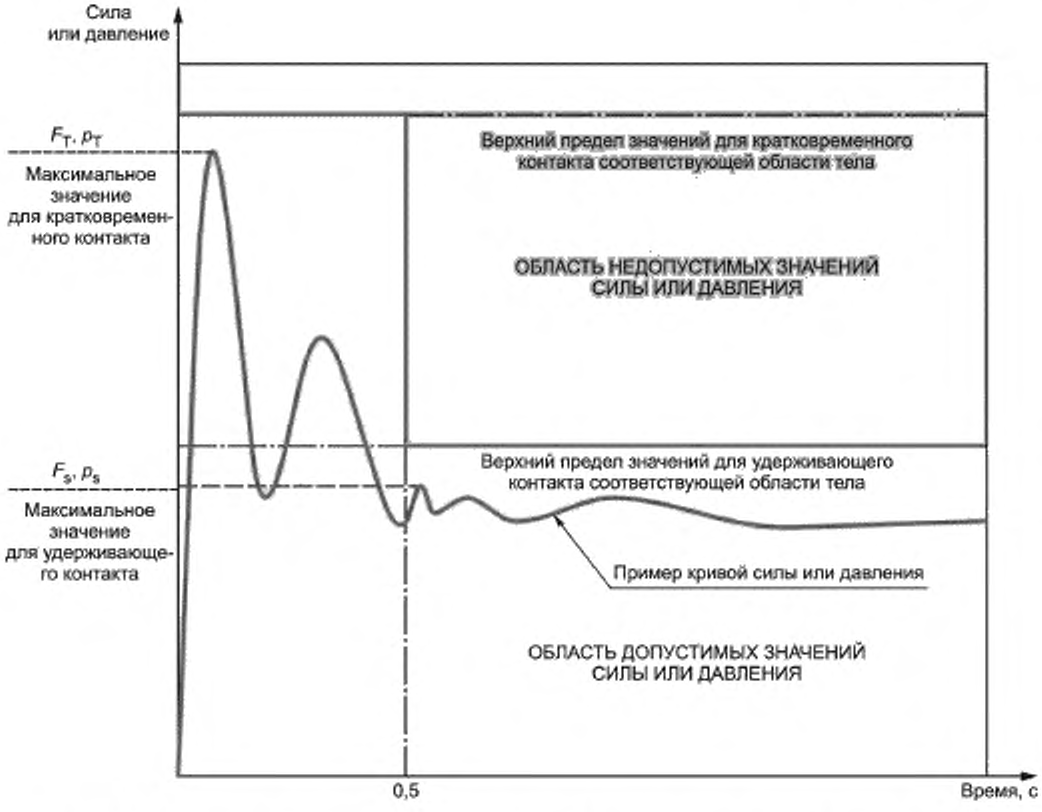


Рисунок 4 — Графическое представление приемлемых и неприемлемых значений силы и давления

7.2 Информация, относящаяся к роботам для совместной работы

Документация, прилагаемая к робототехническому комплексу для совместной работы, предназначена для конкретного приложения, использующего совместную работу. Интегратор должен предоставить пользователю необходимую информацию по использованию комплекса. Она должна включать информацию по использованию защитных средств и выбору режима работы, необходимого для совместного выполнения технологических операций. Интегратор должен предоставить следующую информацию о проектировании комплекса в дополнение к требованиям ИСО 10218-2:2011 (раздел 7):

а) изготовитель или интегратор (если интегратор разработал робототехнический комплекс для совместной работы);

б) организация тестирования (если тестирование проводилось);

в) тип робота и краткое описание приложения для совместной работы;

г) описание рабочего места в прикладном процессе (наименование рабочего места, включая робота для совместной работы).

7.3 Описание робототехнического комплекса для совместной работы

Должны быть представлены следующие документы:

а) спецификации для использования робота для совместной работы в приложении (описания, рисунки и чертежи);

b) описание и спецификации защиты применительно к совместному рабочему пространству, всему рабочему месту и робототехнического комплекса для совместной работы;

c) описание элементов управления для выбора и отмены выбора соответствующих типов совместной работы.

7.4 Описание прикладной системы для использования на рабочем месте

Должны быть представлены следующие документы:

a) описание пространственных условий окружающей среды, входов, выходов, маршрутов движения,

b) описание оборудования, установок, производственных механизмов, необязательных предметов оборудования, инструментов и изделий, имеющихся в рабочем пространстве, которые имеют отношение к приложению, и их позиционирование, в том числе позиционирование робототехнического комплекса;

c) подробные чертежи и рисунки.

7.5 Описание рабочего задания

Рабочее задание должно содержать:

a) описание всех соответствующих рабочих операций или видов действий оператора;

b) описание соответствующих видов деятельности или операций робототехнического комплекса;

c) спецификацию хронологической последовательности всех видов действий, особенно тех, которые происходят в совместном рабочем пространстве;

d) документацию по измерениям опасных расстояний между роботом и человеком на всех этапах работы;

e) описание или чертеж совместного рабочего пространства.

7.6 Информация, относящаяся к прикладным системам с ограничением мощности и силы

Для робототехнических комплексов, отвечающих требованиям 5.5.5, должны быть составлены документы (в соответствии с указаниями в приложении А), содержащие:

a) информацию, относящуюся к роботу, инструменту и заготовке (см. А.3.6, приложение А), в том числе:

1) эффективную полезную нагрузку (m_L);

2) общую массу движущихся частей робота (M);

b) ожидаемые и разумно предсказуемые ситуации контакта между робототехническим комплексом и оператором, включая:

1) конкретную площадь участка тела, с которым возможен контакт (см. таблицу А.1, приложение А);

2) информацию, является ли контакт кратковременным или квазистатическим;

3) предполагаемую площадь поверхности или геометрические параметры, связанные с поверхностями контакта;

4) максимально допустимые биомеханические пределы, связанные с контактом (см. таблицу А.2, приложение А);

c) выбранные предлагаемые меры по снижению рисков:

1) рекомендуемые пассивные или активные меры по снижению риска (см. 5.5.5.4);

2) если используется контроль скорости с расчетной безопасностью, то в документации должно быть указано предельное значение скорости с расчетной безопасностью (см. А.3.6, приложение А).

Для робототехнических комплексов, отвечающих требованиям 5.5.5, использующих методы, которые отличаются от указанных в приложении А, документация должна включать соответствующие данные и информацию для реализации функции ограничения мощности и силы.

Приложение А
(справочное)

Пределы для квазистатического и кратковременного контактов

А.1 Общие положения

В ИСО 10218-2:2011 (подпункт 5.11.5.5) указано, что параметры мощности, силы и эргономики, относящиеся к робототехническим комплексам для совместной работы с ограничениями по мощности и силе, следует определять в процессе оценки рисков. Информация о конструкции робототехнического комплекса для совместной работы приведена в 5.4.4 настоящего стандарта.

В настоящем приложении приведены указания о том, как устанавливать пороговые предельные значения для робототехнического комплекса, предназначенного для совместной работы, в частности, для прикладных систем с ограничением мощности и силы. Основополагающее предположение, лежащее в основе этого руководства, заключается в том, что ограничения, налагаемые на робототехнический комплекс для совместной работы, можно рассчитать на основе порогов чувствительности боли в ситуациях, когда такой контакт возникает при взаимодействии человека и робота. Пороговые предельные значения могут быть использованы для установления предельных значений давления и силы для различных участков тела с применением модели тела. Эти данные затем могут быть экстраполированы для установления пределов передачи энергии при взаимодействии человека с роботом. Роботу, перемещающемуся в совместном рабочем пространстве, могут быть предписаны ограничения скорости. Предельные значения скорости будут ограничивать значения силы и давления ниже порога чувствительности к боли, если произойдет контакт оператора с роботом.

Предельные значения в настоящем приложении основаны на консервативных оценках и научных исследованиях по болевым ощущениям.

Руководство в настоящем приложении предназначено как информативное средство для описания метода, с использованием которого интеграторы могут устанавливать ограничения по мощности и величине сил в разрабатываемых ими приложениях.

А.2 Модель тела

При оценке рисков в совместных прикладных системах с ограничением мощности и силы предполагается, что может произойти случайный контакт между частями робототехнического комплекса и оператором.

На первом шаге процедуры оценки рисков устанавливается, какой частью тела оператор может войти в контакт с роботом. Значение этого исследования состоит в том, что разные участки тела будут иметь разные пороговые значения для выдерживания биомеханической нагрузки без каких-либо даже незначительных травм.

В настоящем описании используется модель тела, включающая 29 участков тела, находящихся в 12 областях. На рисунке А.1 указаны точки контакта в модели тела, в таблице А.1 показаны конкретные участки тела, входящие в общие области, расположенные с передней либо с задней стороны.

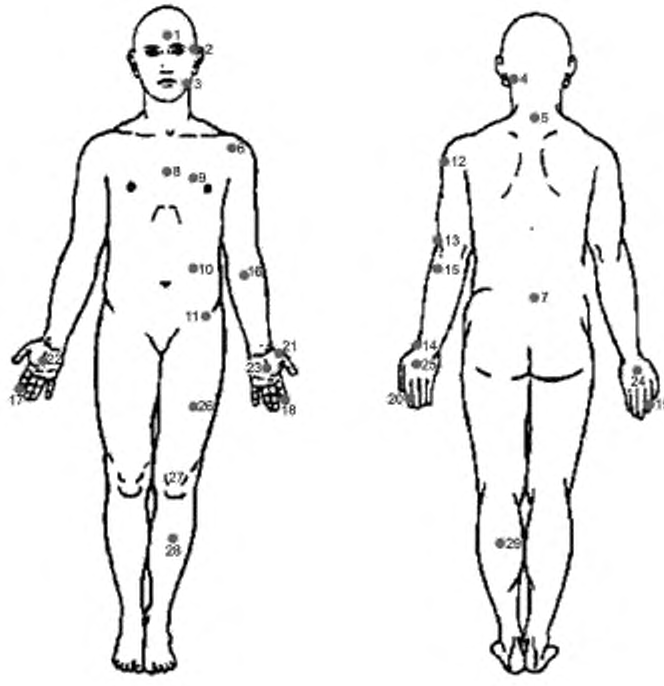


Рисунок А.1 — Модель тела

Таблица А.1 — Модель тела

Область тела	Участок тела		Спереди/сзади
Череп и лоб	1	Середина лба	Спереди
	2	Висок	Спереди
Лицо	3	Жевательная мышца	Спереди
Шея	4	Мышца шеи	Сзади
	5	Седьмой шейный позвонок	Сзади
Спина и плечи	6	Плечевой сустав	Спереди
	7	Пятый поясничный позвонок	Сзади
Грудь	8	Грудина	Спереди
	9	Грудная мышца	Спереди
Живот	10	Брюшная мышца	Спереди
Таз	11	Тазовая кость	Спереди
Верхняя часть руки и локтевые суставы	12	Дельтовидная мышца	Сзади
	13	Плечевая кость	Сзади

Окончание таблицы А.1

Область тела	Участок тела		Спереди/сзади
Предплечья и суставы запястья	14	Лучевая кость	Сзади
	15	Мышца предплечья	Сзади
	16	Нерв руки	Спереди
Кисти и пальцы	17	Подушечка указательного пальца D [a]	Спереди
	18	Подушечка указательного пальца ND [a]	Спереди
	19	Последний сустав указательного пальца D [a]	Сзади
	20	Последний сустав указательного пальца ND [a]	Сзади
	21	Бугорок тенара	Спереди
	22	Ладонь D [a]	Спереди
	23	Ладонь ND [a]	Спереди
	24	Тыльная сторона кисти D [a]	Сзади
	25	Тыльная сторона кисти ND [a]	Сзади
Бедра и колени	26	Мышца бедра	Спереди
	27	Надколенная чашечка	Спереди
Нижняя часть ног	28	Середина голени	Спереди
	29	Икроножная мышца	Сзади

[a] D — доминантная сторона тела; ND — недоминантная сторона тела.

А.3 Биомеханические ограничения

А.3.1 Общие положения

Биомеханические ограничения устанавливают допустимый уровень нагрузки, возникающей вследствие движения робота, которая может создать возможность даже незначительной травмы оператора в случае его контакта с роботом.

Они могут быть применены для нахождения пределов давления и силы с использованием оценок, установленных исследованиями (см. [2], [3], [4] и [7]), в случае кратковременного контакта. Энергия переноса, возникающая в результате гипотетического контакта между роботом и человеком, может быть смоделирована в предложении полностью неупругого контакта между роботом и оператором и с учетом грузоподъемности робота и факторов, связанных с областью тела оператора, находящегося в контакте. Как только энергия переноса будет установлена, смогут быть установлены рекомендации ограничения скорости движения робота в совместном рабочем пространстве для поддержания энергии передачи на уровне ниже порога даже незначительной травмы человека в случае контакта между роботом и оператором в совместном рабочем пространстве.

А.3.2 Максимальные значения давления и силы

В таблице А.2 приведены максимальные значения давления и силы для квазистатического и временного контактов между людьми и робототехническим комплексом.

Контактные данные в таблице А.2 не отражают какого-либо использования средств индивидуальной защиты или чего-либо иного, кроме одежды, типичной для любой рабочей среды.

Хотя в таблице А.2 и приведены данные для контакта с лицом, черепом и лбом, контакт с этими местами недопустим (см. 5.5.5.3 настоящего стандарта).

Таблица А.2 — Биомеханические пределы

Область тела	Участок тела		Квазистатический контакт		Кратковременный контакт	
			Допустимое давление[a] p_s, Н/см^2	Допустимая сила[b], Н	Допустимый множитель давления[c], P_T	Допустимый множитель силы[c], F_T
Череп и лоб [d]	*1*	*Середина лба*	*130*	*130*	*Не применимо*	*Не применимо*
	2	*Висок*	*110*		*Не применимо*	
Лицо [d]	*3*	*Жевательная мышца*	*110*	*65*	*Не применимо*	*Не применимо*
Шея	4	Мышца шеи	140	150	2	2
	5	Седьмой шейный позвонок	210		2	
Спина и плечи	6	Плечевой сустав	160	210	2	2
	7	Пятый спинной позвонок	210		2	
Грудь	8	Грудина	120	140	2	2
	9	Грудная мышца	170		2	
Брюшная полость	10	Брюшная мышца	140	110	2	2
Таз	11	Тазовая кость	210	180	2	2
Верхняя часть руки и локтевые суставы	12	Дельтовидная мышца	190	150	2	2
	13	Плечевая кость	220		2	
Предплечья и суставы запястья	14	Лучевая кость	190	160	2	2
	15	Мышца предплечья	180		2	
	16	Нерв руки	180		2	
Кисти и пальцы	17	Подушечка указательного пальца D	300	140	2	2
	18	Подушечка указательного пальца ND	270		2	
	19	Последний сустав указательного пальца D	280		2	
	20	Последний сустав указательного пальца ND	220		2	
	21	Тенар	200		2	
	22	Ладонь D	260		2	
	23	Ладонь ND	260		2	
	24	Тыльная сторона кисти D	200		2	
	25	Тыльная сторона кисти ND	190		2	

Окончание таблицы А.2

Область тела	Участок тела		Квазистатический контакт		Кратковременный контакт	
			Допустимое давление[a] p_S, Н/см^2	Допустимая сила[b], Н	Допустимый множитель давления[c], P_T	Допустимый множитель силы[c], F_T
Бедра и колени	26	Мышца бедра	250	220	2	2
	27	Надколенная чашечка	220		2	
Голени	28	Середина голени	220	130	2	2
	29	Икроножная мышца	210		2	

[a] Представленные биомеханические значения являются результатом исследования, проведенного Университетом Майнца по уровням начала боли. Хотя это исследование было выполнено с использованием самых современных методов тестирования, приведенные здесь значения являются результатом единственного исследования в предметной области, которое не было основой обширных исследований. Ожидается, что в будущем будут проведены дополнительные исследования, которые могут привести к изменению этих значений. Тестирование проводилось с использованием 100 здоровых взрослых испытуемых на 29 конкретных точках тела, и для каждой точки на теле были установлены пределы начала болевых порогов давления и силы для квазистатического контакта. Максимально допустимые значения давления, показанные здесь, представляют собой 75-й процентиль диапазона зарегистрированных значений для определенной точки на теле. Они определяются как физическая величина, соответствующая тому, когда давление, прикладываемое к конкретной точке на теле, создает ощущение, соответствующее началу возникновения боли. Пиковые давления основаны на средних значениях с разрешением 1 мм^2. Результаты исследования основаны на испытательном аппарате с использованием плоской 1,4 × 1,4 см (металлической) испытательной поверхности с закруглением 2 мм на всех четырех краях. Существует вероятность того, что другое тестовое устройство может выдать другие результаты. Более подробную информацию об исследовании см. в [5].

[b] Значения для максимально допустимой силы получены из исследования, проведенного независимой организацией (см. [6]), которое ссылается на 188 источников. Эти значения относятся только к областям тела, а не к конкретным точкам на теле. Максимально допустимая сила основана на критерии передачи наименьшей энергии, которая может привести даже к незначительной травме, такой, как синяк, что эквивалентно степени тяжести 1 по сокращенной шкале повреждений (AIS), созданной Ассоциацией по развитию автомобильной медицины США. Соблюдение ограничений сможет предотвратить проникновение в кожу или мягкие ткани, имеющие степень тяжести ниже чем AIS 1, сопровождающееся кровоточащими ранами, переломами костей или другим повреждением скелета. Они могут быть уточнены в будущем по результатам дальнейших исследований робототехнических комплексов, предназначенных для совместной работы.

[c] Значение множителя для кратковременного контакта получено на основе исследований, которые показывают, что кратковременные предельные значения для силы и давления могут быть минимум в два раза выше квазистатических значений. Подробности исследования см. в [2], [3], [4] и [7].

[d] Критические области выделены курсивом.

А.3.3 Связь между давлением и силой

В целях оценки сценария контакта в робототехническом комплексе для оценки рисков необходимо рассчитать и учесть значения силы и давления.

Пример 1 — В случае, если оператор оказался в зоне инструмента работающего робототехнического комплекса, руки могут оказаться зажаты частями инструмента или заготовки. Результирующее значение силы может быть значительно ниже предельного значения порога силы. В таком случае ограничивающим фактором вероятно будет предел давления.

Пример 2 — В случае контакта участка тела с мягкой обработанной поверхностью, имеющей относительно большую площадь или области тела с повышенной долей мягких тканей (например, живота), результирующее значение давления может быть значительно ниже предельного порогового значения давления. В таком случае ограничивающим фактором вероятно будет предел силы.

Чтобы уменьшить возможность приложения высокого давления к оператору, робототехнический комплекс, включая заготовку, должен иметь площадь поверхности как можно большего размера. Дополнительная прокладка на поверхности робота увеличивает площадь поверхности соприкосновения, что может привести к снижению давления.

Контакт между жесткими частями робототехнического комплекса и частями человеческого тела может привести к неравномерному распределению давления (пикам давления) над контактной поверхностью. При таких обстоятельствах имеет значение пиковое давление, возникающее в участке контакта.

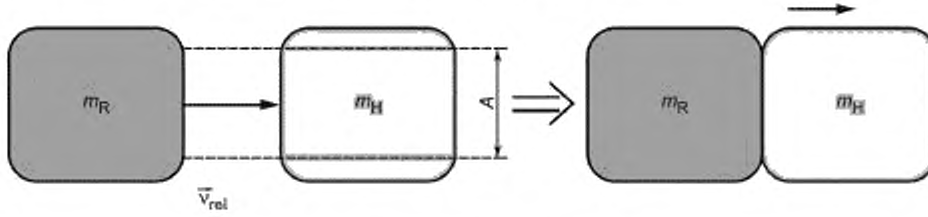
Пределы давления и силы, указанные в настоящем стандарте, не ограничиваются конкретной поверхностью и формой ее края. См. в 5.5.5.3 ограничения на части робототехнических комплексов для совместной работы с оператором, имеющие острые края, такие как ножи или иглы.

А.3.4 Связь между биомеханическими пределами и передачей энергии при кратковременном контакте

Значения в таблице А.2 можно использовать для оценки качества работы робототехнического комплекса для совместной работы с оператором в ситуациях квазистатического контакта с использованием измерительных устройств на робототехническом комплексе.

Если совместная работа связана с кратковременным контактом, сценарий контакта можно смоделировать, используя процедуру, описанную ниже. Моделирование основано на предположении, что для выбранного сценария контакта между роботом и оператором известны контактирующий участок тела и место контакта на теле, а передаваемая энергия может быть уменьшена путем ограничения скорости робота в точке соприкосновения.

Для описания этого сценария контакта используется простая двухуровневая модель, показанная на рисунке А.2. В модели приведенная масса робота m_R входит в контакт с приведенной массой области человеческого тела m_H со скоростью v_{rel} через двумерную область поверхности A при неупругом взаимодействии. Предполагается, что кинетическая энергия относительного движения полностью переходит в пострадавший участок тела. Такой сценарий контакта соответствует исходному допущению о наихудшем случае взаимодействия.



A — площадь контакта между роботом и областью тела; m_H — эффективная масса области человеческого тела; m_R — эффективная масса робота как функция положения степеней подвижности; $\vec{v}_{rel}$ — вектор скорости эффективной массы робота относительно эффективной массы области человеческого тела

Рисунок А.2 — Модель кратковременного контакта

В рассматриваемой модели контакта m_R является функцией полезной нагрузки робототехнического комплекса (включая заготовку) и массы движущихся частей робота, m_H является функцией действительной массы области тела и эффектов, связанных с взаимодействием области тела с другими участками тела. Способы вычисления этих параметров описаны в настоящем приложении. В таблице А.3 приведены значения эффективных масс и коэффициентов жесткости пружин, используемых в моделях областей человеческого тела. Коэффициенты жесткости тела больше для тех областей тела, в которых больше доля мягких тканей, потому что они могут деформироваться и поглощать контакты.

Примечание — Указанные коэффициенты жесткости действительны для точек контакта площадью приблизительно 1 см^2.

Эффективная масса участка тела является функцией его собственной массы и связи с соседними участками тела и обеспечивает способность области тела перемещаться в направлении воздействия со стороны робота, если оно произошло.

Таблица А.3 — Эффективные массы и коэффициенты жесткости для модели тела

Область тела	Эффективный коэффициент жесткости k, Н/мм	Эффективная масса m_H, кг
Череп и лоб	150	4,4
Лицо	75	4,4
Шея	50	1,2
Спина и плечи	35	40
Грудь	25	40

Окончание таблицы А.3

Область тела	Эффективный коэффициент жесткости k, Н/мм	Эффективная масса m_H, кг
Живот	10	40
Таз	25	40
Верхняя часть рук и локтевые суставы	30	3
Нижняя часть рук и кистевые суставы	40	2
Кисти и пальцы	75	0,6
Бедра и колени	50	75
Нижняя часть ног	60	75
Примечание — Значения массы бедер, коленей и нижних частей ног приравниваются к массе всего тела, так как эти части тела не могут свободно отступать или удаляться от удара, когда оператор стоит.		

Для каждой области тела может быть рассчитан максимально допустимый перенос энергии, как функция значений максимальной силы или давления, показанных в таблице А.2, с использованием следующей формулы:

$$E = \frac{F_{max}^2}{2k} = \frac{A^2 p_{max}^2}{2k}, \quad (A.1)$$

где E — передаваемая энергия;

F_{max} — максимальное контактное усилие для конкретной области тела (см. таблицу А.2);

k — эффективный коэффициент жесткости для конкретной области тела (см. таблицу А.3);

A — характерный размер пятна контакта между роботом и областью тела;

p_{max} — максимальное контактное давление для конкретного места на теле (см. таблицу А.2).

Применение формулы (А.1) к значениям кратковременного контакта из таблицы А.2 приводит к передаче предельных значений энергии для каждого участка тела, как показано в таблице А.4.

Таблица А.4 — Предельные значения энергии на основе модели участка тела

Участок тела	Максимум переданной энергии E, Дж
Череп и лоб	0,23
Лицо	0,11
Шея	0,84
Спина и плечи	2,5
Грудь	1,6
Живот	2,4
Таз	2,6
Верхняя часть рук и локтевые суставы	1,5
Нижняя часть рук и кистевые суставы	1,3
Кисти и пальцы	0,49
Бедра и колени	1,9
Нижняя часть ног	0,52

А.3.5 Связь между переданной энергией и скоростью робота во время кратковременного контакта

Как только установлено предельное значение передачи энергии для исследуемого сценария контакта, его можно использовать для определения максимальной скорости, с которой робот мог бы перемещаться через

совместное рабочее пространство, сохраняя при этом возможные значения давления и силы ниже пороговых пределов из таблицы А.2, если эти контакты между робототехническим комплексом и оператором должны были случиться.

Предположение, принимаемое при выводе предела скорости контакта, состоит в том, чтобы приравнять энергию пружины участка человеческого тела к полной кинетической энергии точки, координаты которой совпадают с координатами центра масс, предполагая полностью неупругий контакт. Энергию в этой модели определяют по формуле

$$E = \frac{F^2}{2k} = \frac{1}{2}\mu v_{rel}^2, \tag{A.2}$$

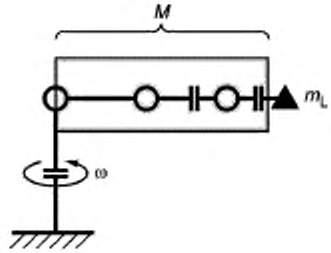
где v_{rel} — относительная скорость между роботом и участком человеческого тела;

μ — приведенная масса системы двух тел.

$$\mu = \left(\frac{1}{m_H} + \frac{1}{m_R}\right)^{-1}, \tag{A.3}$$

где m_H — эффективная масса участка человеческого тела (см. таблицу А.3);

m_R — эффективная масса робота в зависимости от положения и движения робота (см. рисунок А.3),



m_L — эффективная полезная нагрузка робототехнического комплекса; M — общая масса движущихся частей робота; ω — скорость вращения

Рисунок А.3 — Упрощенная модель распределения масс

$$m_R = \frac{M}{2} + m_L, \tag{A.4}$$

где M — общая масса движущихся частей робота;

m_L — эффективная полезная нагрузка робототехнического комплекса, включая инструменты и заготовку.

Примечание — В информации по использованию должны быть указаны значения для m_L и M (см. 7.6).

Из формулы (А.2) следует:

$$v_{rel} = \frac{F}{\sqrt{\mu k}} = \frac{pA}{\sqrt{\mu k}}, \tag{A.5}$$

где p — максимально допустимое значение давления (см. таблицу А.2).

Это выражение может быть непосредственно сведено к максимально допустимым значениям:

$$v_{rel,max} = \frac{F_{max}}{\sqrt{\mu k}} = \frac{p_{max} A}{\sqrt{\mu k}}. \tag{A.6}$$

Для того, чтобы применить формулу (А.6), сначала вычисляют приведенную массу системы двух тел μ на основе m_R и m_H, определяют $p_{max,}$ опираясь на значения, представленные в таблице А.1, затем определяют k с использованием значений, приведенных в таблице А.3.

Площадь контакта A определяется как наименьшая из площадей поверхности робота или оператора. В ситуациях, когда площадь поверхности контакта тела меньше площади поверхности контакта робота, например для рук или пальцев, следует использовать фактическую площадь поверхности контакта с телом. Если может возникнуть контакт между несколькими точками на теле с различными возможными площадями поверхностей контакта, следует использовать такое значение A, которое дает наименьшее значение $v_{rel, max}$.

В таблице А.5 показаны предельные значения скорости (мм/с), для неограниченного кратковременного контакта, которые могут быть получены из модели контакта, при условии, что площадь контакта A составляет 1 см^2. Графики предельных значений скорости робота показаны на рисунке А.4. Оценку рисков следует проводить с учетом фактических значений скоростей перемещения робототехнического комплекса, и значения скоростей, рассчитанные при оценке рисков, следует использовать для определения того, соответствует ли роботизированная ячейка для совместной работы условиям выполнения технологических операций.

В некоторых случаях при квазистатическом контакте может иметь место кратковременное увеличение силы или давления (начальный пик) очень короткой продолжительности, т. к. m_H и m_R достигают равновесного переноса энергии в течение периода зажима. Если такая начальная сила или пик давления существуют и могут быть измерены контрольно-измерительной аппаратурой, которая может отличать начальную силу или давление от силы равновесия или давления, значение начальной силы или значение давления должны быть ограничены соответствующим значением кратковременного контакта.

Таблица А.5 — Предельные значения скорости при кратковременном контакте, рассчитанные на основе модели тела

Область тела	Предельные значения скорости, мм/с, в зависимости от эффективной массы робота, кг, и оказываемого им допустимого давления на площадку 1 см^2					
	1	2	5	10	15	20
Рука/палец	2400	2200	2000	2000	2000	1900
Нижняя часть руки	2200	1800	1500	1400	1400	1300
Верхняя часть руки	2400	1900	1500	1400	1300	1300
Живот	2900	2100	1400	1000	870	780
Таз	2700	1900	1300	930	800	720
Верхняя часть ноги	2000	1400	920	670	560	500
Нижняя часть ноги	1700	1200	800	580	490	440
Плечи	1700	1200	790	590	500	450
Шея	1500	1100	700	520	440	400

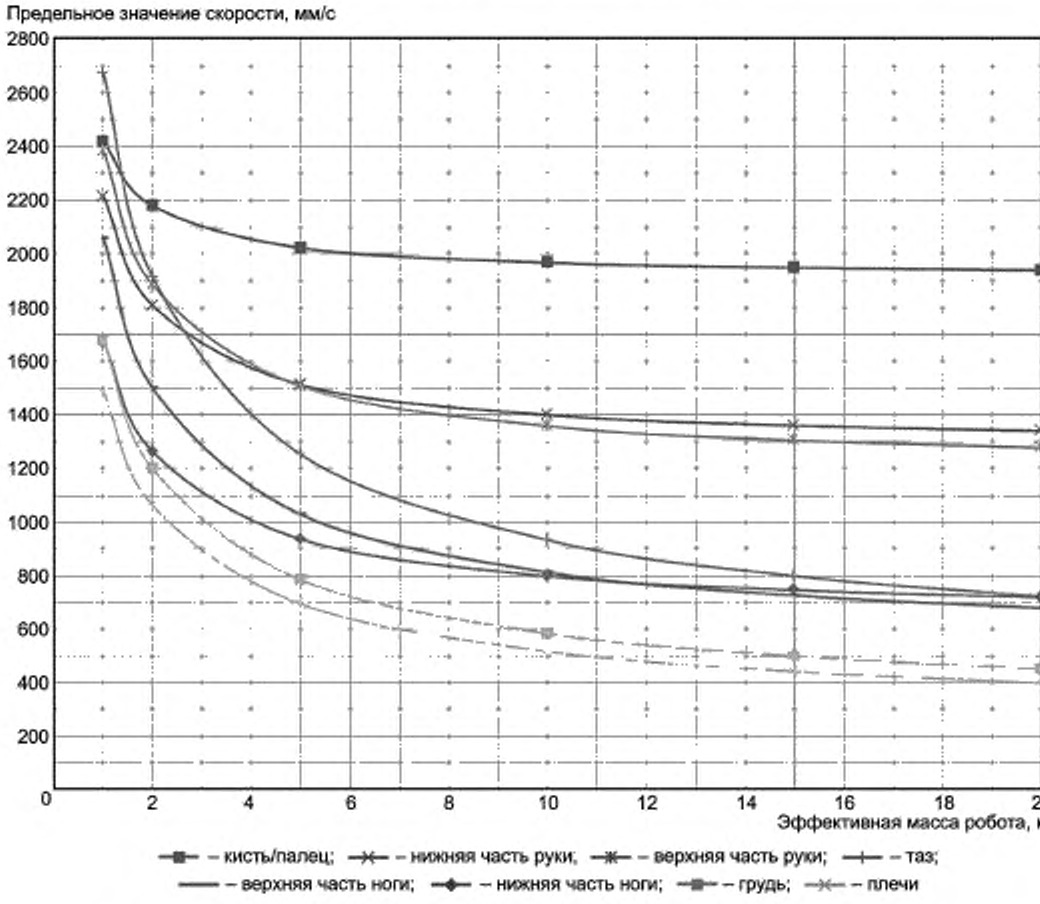


Рисунок А.4 — Графическое представление расчетного предельного значения скорости, найденного из модели тела

А.3.6 Ограничения модели тела

Модель тела является средством, с использованием которого интеграторы робототехнических комплексов для совместной работы могут использовать научные принципы для задания надлежащих ограничений, связанных с оценкой рисков для робототехнических комплексов, выполняющих совместные операции с ограничением мощности и силы. Это является новой областью исследований и предметом дальнейшего изучения и анализа.

Более того, модель тела представлена как средство, с использованием которого интегратор роботов может применять научные принципы и стандартизованный подход к анализу оценки рисков, включая ситуацию гипотетического контакта между оператором и роботом с ограничением по мощности и силе.

Предполагается, что кратковременный контакт между роботом и областью тела приводит к полностью неупругому столкновению двух тел. Вполне вероятно, что фактический сценарий кратковременного контакта будет находиться между совершенно эластичными и совершенно неупругими столкновениями.

Модель контакта с двумя телами предполагает, что площадь контактной поверхности между роботом и областью человеческого тела плоская, с равномерным распределением давления по площади поверхности. В настоящее время проводятся исследования, оценивающие влияние различных геометрических форм и конфигураций контактов, связанных с моделью тела. Фактические условия контакта, включая геометрическую форму области контакта, необходимо соотнести со значениями силы и давления из таблицы А.2 путем измерений или расчетов.

Приложение ДА
(справочное)

Сведения о соответствии ссылочных международных стандартов национальным и межгосударственным стандартам

Таблица ДА.1

Обозначение ссылочного международного стандарта	Степень соответствия	Обозначение и наименование соответствующего национального, межгосударственного стандарта
ISO 10218-1: 2011	IDT	ГОСТ Р 60.1.2.1—2016 / ИСО 10218-1:2011 «Роботы и робототехнические устройства. Требования по безопасности для промышленных роботов. Часть 1. Роботы»
ISO 10218-2: 2011	IDT	ГОСТ Р 60.1.2.2—2016 / ИСО 10218-2:2011 «Роботы и робототехнические устройства. Требования по безопасности для промышленных роботов. Часть 2. Робототехнические системы и их интеграция»
ISO 12100	IDT	ГОСТ ISO 12100—2013 «Безопасность машин. Основные принципы конструирования. Оценки риска и снижение риска»
ISO 13850	MOD	ГОСТ Р 51336—99 «Безопасность машин. Установки аварийного выключения. Функции. Принципы проектирования»
ISO 13855	IDT	ГОСТ ИСО 13855—2006 «Безопасность оборудования. Расположение защитных устройств с учетом скоростей приближения частей тела человека»
IEC 60204-1	IDT	ГОСТ Р МЭК 60204-1—2007 «Безопасность машин. Электрооборудование машин и механизмов. Часть 1. Общие требования»

Примечание — В настоящей таблице использованы следующие условные обозначения степени соответствия стандартов:

- IDT — идентичные стандарты;
- MOD — модифицированные стандарты.

Библиография

[1] IEC/TS 62046:2008, Safety of machinery — Application of protective equipment to detect the presence of persons

[2] EN 12453:2000, Industrial, commercial and garage doors and gates — Safety in use of power operated doors — Requirements

[3] D. Mewes, F. Mauser Safeguarding Crushing Points by Limitation of Forces. Int. J. Occup. Saf. Ergon. 2003, 9 (2) pp. 177—191

[4] K. Suita, Y. Yamada, N. Tsuchida, K. Imai, H. Ikeda, N. Sugimoto A Failure-to-safety «Kyozon» system with simple contact detection and stop capabilities for safe human-autonomous robot coexistence. IEEE International Conference on Robotics and Automation 0-7803-1965-6/95. 1995

[5] Research project No. FP-0317:Collaborative robots — Investigation of pain sensibility at the Man-Machine-Interface. Institute for Occupational, Social and Environmental Medicine at the Johannes Gutenberg University of Mainz, Germany. Final report December 2014

[6] BG/BGIA Risk assessment recommendations according to machinery directive. Design of workplaces with collaborative robots. U 001/2009e October 2009 edition, revised February 2011
gost.e-ecolog.ru .de/dguv/pdf/10002/bg_bgia_empf_u_001e.pdf

[7] Suita Yamada, Sugimoto Ikeda, Nakamura Miura Pain: Evaluation of pain tolerance based on a biomechanical method for human- robot- coexistence. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. No 96-0689. 1997-8

[8] USAARL Report No 88-5 Anthropometry and Mass Distribution for Human Analogues. Military Male Aviators, Vol. I, 1988

[9] Roland Behrens, Norbert Elkmann Experimentelle Verifikation der biomechanischen Belastungsgrenzen bei Mensch-Roboter-Kollisionen: Phase I, Fraunhofer-Institut fuer Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF, Magdeburg, October 2014

УДК 621.865.8:007.52:67.05:006.354 ОКС 25.040.30

Ключевые слова: роботы, робототехнические устройства, промышленные роботы, манипуляционные роботы, требования безопасности, роботы, работающие совместно с человеком

Редактор *Л.И. Нахимова*
Технический редактор *И.Е. Черепкова*
Корректор *О.В. Лазарева*
Компьютерная верстка *Е.А. Кондрашовой*

Сдано в набор 16.08.2021. Подписано в печать 31.08.2021. Формат 60×84¼. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 4,18. Уч.-изд. л. 3,65.

Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

Создано в единичном исполнении в ФГБУ «РСТ»
для комплектования Федерального информационного фонда стандартов
117418 Москва, Нахимовский пр-т, д. 31, к. 2.
gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru

gost.e-ecolog.ru