

**ПЕРЕПОДГОТОВКА КАДРОВ ДЛЯ ИНДУСТРИИ 4.0:
МЕТОДИКА ОБУЧЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ
ПРОМЫШЛЕННОГО ЭКЗОСКЕЛЕТА**

**RETRAINING OF PERSONNEL FOR INDUSTRY 4.0:
METHODS OF TEACHING OF THE INDUSTRIAL
EXOSKELETON OPERATION**

С.Ф. ЯЦУН, А.С. ЯЦУН, А.В. МАЛЬЧИКОВ, Е.Н. ПОЛИТОВ
S.F. YATSUN, A.S. YATSUN, A.V. MALCHIKOV, E.N. POLITOV

(Юго-Западный государственный университет)

(Southwestern State University)

E-mail: newteormeh@inbox.ru

Статья посвящена разработке методики обучения эффективного и безопасного использования промышленного экзоскелета для облегчения труда рабочих при выполнении такелажных и монтажных работ на производстве в условиях перехода к новому технологическому укладу Индустрии 4.0.

Цель исследования заключается в создании уникальной методики обучения, включающей набор практико-ориентированных упражнений, позволяющих обучающимся специалистам получить первичные навыки эффективного и безопасного использования промышленного экзоскелета.

Предлагаемая методика обучения основана на знаниях в области биомеханики физических упражнений, физиологических особенностях человеческого тела. Разработанный комплекс упражнений основан на анализе типовых технологических операций работников легкой и тяжелой промышленности, специалистов по ремонту и монтажу оборудования.

В работе предлагается некоторый педагогический материал, включающий теоретические и практические разделы, при освоении которых у специалистов формируются новые компетенции, связанные с цифровизацией и автоматизацией производства, необходимые для эффективного и безопасного использования промышленного экзоскелета.

Сформирована теоретически обоснованная методика обучения, которая прошла апробацию при обучении специалистов ведущих предприятий России.

The article describes methods of teaching effective and safe use of industrial exoskeleton to facilitate the labor of the workers when running rigging and installation work in production in the conditions of transition to new technological order Industry 4.0.

The aim of the study consists in creating the unique learning method that includes a set of practice-oriented exercises, allowing getting the primary skills for effective and safe use of industrial exoskeleton.

The proposed teaching methodology is based on the knowledge in the field of biomechanics of physical exercises, physiological features of the human body. The developed set of exercises is based on the analysis of typical technological operations of light and heavy industry workers, specialists in repair and installation of equipment.

The paper offers some pedagogical materials, including theoretical and practical sections, during the development of which specialists form new competencies related to digitalization and automation of production, necessary for the effective and safe use of an industrial exoskeleton.

A theoretically grounded training methodology has been formed, this methodology was tested during the training of specialists from leading Russian enterprises.

Ключевые слова: Индустрия 4.0, промышленный экзоскелет, методика обучения, эксплуатация экзоскелетов, подготовка кадров, автоматизация.

Keywords: Industry 4.0, industrial exoskeleton, training methodology, exoskeleton operation, personnel training, automation.

Введение

Внедрение элементов Индустрии 4.0 в производство требует расширения компетенций в digital-сфере и объединения цифровых технологий и промышленности [1].

Одной из составляющих совершающейся четвертой промышленной революции является повсеместное внедрение киберфизических систем, в том числе человеко-машинных комплексов [2].

Вместе с тем растут объемы производства и ужесточаются требования к обеспечению охраны труда, однако при этом роботизация и автоматизация многих технологических операций на сегодняшний день затруднена или не представляется целесообразной.

Все это способствует росту интереса и внедрению в производственный процесс промышленных экзоскелетов [3], [4].

Современные тенденции развития рынка экзоскелетов представлены в работах [5...8], конструктивные особенности человеко-машинных комплексов приведены в работах [9], [10].

Промышленный экзоскелет – роботизированное устройство, обеспечивающее снижение физических нагрузок на человека и позволяющее улучшить условия труда, снизить травмоопасность и утомляемость при работах с тяжелым ручным инструментом, при поднятии, удержании и переносе грузов. Экзоскелет позволяет выполнять движения, минимально ограничивая перемещения оператора и разгружая опорно-двигательный аппарат, что позволяет оператору экзоскелета работать более дли-

тельное время, испытывая меньшие нагрузки [11].

Принцип действия экзоскелета основан на передаче нагрузки с человека на механический силовой каркас, компенсации изгибающих моментов в суставах. В ходе выполнения технологических операций нагрузка распределяется по силовому каркасу – что снижает вероятность получения травм поясничного отдела позвоночника [12].

При этом экзоскелет является сложным электромеханическим устройством, принципы функционирования которого основаны на человеко-машинном взаимодействии, что требует от оператора наличия навыков использования экзоскелета, учета особенностей выполнения технологических операций с его применением, соблюдения правил безопасности, позволяющих предотвратить появление нестандартных ситуаций, поломке оборудования и нанесения травм.

Очевидно, что внедрение подобного оборудования в технологические процессы предприятия требует обучения и переподготовки персонала, освоения теоретических аспектов использования, выполнения практических заданий.

Однако разработка методики обучения, позволяющей в кратчайшие сроки, без отрыва от работы, развить навыки использования сложного оборудования, является сложной задачей.

Некоторые аспекты построения образовательной модели проектно-ориентированной подготовки молодых специалистов инженерно-технических направлений в кон-

цепции Индустрии 4.0 представлены в работе [13].

Для достижения поставленной задачи в настоящей работе предлагается комплексная методика, основанная на последовательных этапах обучения, включающих широкий набор упражнений, часть из которых может быть кастомизирована в зависимости от базовой специальности обучающегося.

Материалы и методы

В качестве примера в работе рассматривается промышленный экзоскелет, конст-

руктивно повторяющий скелет человека. Металлические звенья аппарата соединяются посредством шарниров, каждый из которых имеет разное число степеней подвижности. Шарнирное соединение бедра с корпусом, как и у человека, имеет три степени свободы. Оно может вращаться вокруг двух горизонтальных осей: "вперед-назад" и "отведение-приведение", а также – вокруг вертикальной оси [14].

Основные параметры экзоскелета приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Характеристика экзоскелета	Значение
Габариты	1,80 x 0,5 x 0,4 (м)
Масса	24 (кг)
Рабочая нагрузка	40(кг)
Предельно допустимая нагрузка на экзоскелет	60 (кг)

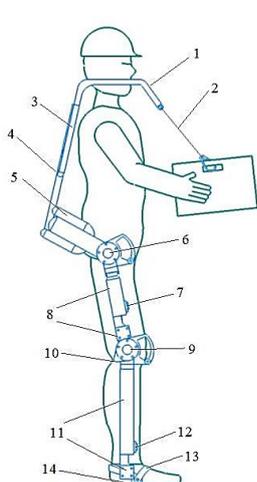


Рис. 1

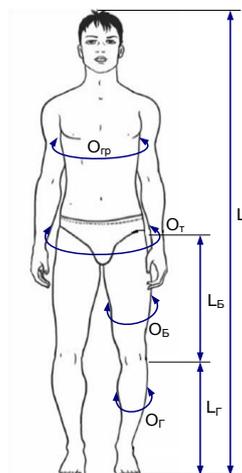


Рис. 2

Устройство (рис.1 – схема конструкции экзоскелета) состоит из следующих основных элементов: силовой каркас спины 1, включающий в себя гибкие звенья (тросы) 2, к которым крепится груз, крепление туловища 3, регулировочные элементы сило-

вого каркаса 4, поясничный узел 5. Силовой каркас спины 1 соединяется с нижними конечностями экзоскелета в бедренном шарнирном узле 6, в котором реализованы 3 степени свободы. Нижние конечности экзоскелета состоят из бедра и голени, которые включают в свою конструкцию следующие элементы: бедренные манжеты – 7, регулировка длины звена 8, коленный шарнир 9, упор для сидения 10, звено голени – 11, крепежный элемент голени 12, фиксирующие элементы для крепления стопы – 13, упругая опора 14.

Экзоскелет снабжен рядом регулировок, необходимых для обеспечения комфортной эксплуатации и для пользователей различной комплекции. Антропометрические параметры и диапазон значений показаны в табл. 2 (допустимые антропометрические параметры оператора) и на рис. 2 (места необходимых замеров).

Т а б л и ц а 2

Параметры экзоскелета	Значения
Рост L	1,6...1,9 (м)
Длина голени со стопой L _г	50...60 (см)
Длина бедра L _б	45...55 (см)
Обхват груди O _{гр}	100...200 (см)
Обхват таза O _т	100...200 (см)
Обхват бедра O _б	60...100 (см)
Обхват голени O _г	40...60 (см)
Длина бедра L _б	45...55 (см)
Масса оператора	от 60 кг до 120 кг

Результаты и их обсуждение

Для обучения основам эксплуатации промышленного экзоскелетного комплекса была разработана оригинальная методика, заключающаяся в поэтапном освоении теоретического материала и выполнении практических упражнений. Практические упражнения разработаны на основании анализа типовых задач применения экзоскелета, к которым можно отнести: ходьбу по

горизонтальной и наклонной поверхностям, работу в вертикальном положении или положении сидя, подъем, удержание и опускание груза, подъем и спуск по лестнице с грузом и без. Важным этапом обучения является получение навыков надевания и регулировки экзоскелета.

Содержание образовательного курса представлено в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Этапы обучения	Подразделы дисциплин (группы упражнений)
1. Освоение теоретических основ	Теоретические аспекты эксплуатации экзоскелетов
	Изучение конструктивных особенностей экзоскелета. Обслуживание. Ремонт
	Правила техники безопасности при работе в экзоскелете
2. Практические упражнения	Настройка экзоскелета под размеры оператора
	Надевание/снятие экзоскелета
	Ходьба в экзоскелете
	Подъем и перенос груза 10...15 кг
	Подъем и перенос груза 25...30 кг
3. Выполнение кейсовых заданий на полигоне	Монтаж детали на вертикальный фланец
	Монтаж детали на горизонтальный фланец
	Монтаж детали в положении сидя
	Переноска и монтаж оборудования (комплексное задание на полигоне)

Первый этап обучения включает набор лекционных и семинарских занятий, на которых обучающиеся знакомятся с общими принципами построения роботизированных устройств, особенностями человеко-машинного взаимодействия, основными конструктивными особенностями промышленных экзоскелетов. Обучающиеся изучают правила использования обслуживания и ремонта отдельных частей изделия. В рамках семинарских занятий изучаются правила безопасного использования, рассматривается поведение оператора в нестандартных ситуациях.

Второй этап предусматривает комплекс практических упражнений, в ходе которых обучающиеся получают навыки прак-

тического использования и настройки экзоскелетов. Время выполнения и/или количество повторений определяется индивидуально для каждого обучающегося инструктором в процессе обучения.

Третий и заключительный этап образовательного курса представляет собой набор кейсовых заданий, наиболее приближенных к реальным условиям. Задача, решаемая в рамках задания, определяется в соответствии со специальностью обучаемого. Это могут быть задачи связанные с монтажом оборудования, такелажные работы, сварочные работы, переноска оборудования и т.д. (табл.4 – содержание практических работ).

Т а б л и ц а 4

Отрабатываемый навык	Наименование упражнения
1. Настройка экзоскелета под размеры оператора	1.1 Настройка размеров голени экзоскелета
	1.2 Настройка высоты бедер
	1.3 Настройка высоты спины
	1.4 Настройка ширины спины
2. Надевание/снятие экзоскелета	2.1 Фиксация стоп
	2.2 Фиксация бедер
	2.3 Фиксация спины
	2.4 Фиксация поясного ремня

3. Ходьба в экзоскелете	3.1 Ходьба по горизонтальной поверхности
	3.2 Ходьба приставным шагом
	3.3 Наклоны и повороты корпуса
	3.4 Приседания до конструкционного упора
	3.5 Ходьба по наклонной поверхности
	3.6 Подъем/спуск по лестнице
4. Подъем и перенос груза 10...15 кг	4.1 Подъем груза
	4.2 Перенос груза
	4.3 Комплексное упражнение с грузом 10...15кг
	4.4 Ходьба по наклонной поверхности
	4.5 Подъем/спуск по лестнице
5. Подъем и перенос груза 25...30 кг	5.1 Подъем груза
	5.2 Перенос груза
	5.3 Комплексное упражнение с грузом 25...30кг
	5.4 Ходьба по наклонной поверхности
	5.5 Подъем/спуск по лестнице

После выполнения всех практических упражнений обучающемуся необходимо пройти зачет, чтобы инструктор мог объективно оценить навыки и степень подготовки оператора.

ВЫВОДЫ

В рамках проведенного исследования была сформирована теоретически обоснованная методика обучения, включающая в себя несколько этапов: теоретический, практический и прикладной. В работе подробно рассмотрена структура курса практических занятий, выполнение которых обеспечивает получение обучающимися первичных навыков эффективного и безопасного использования экзоскелета. Практическая часть представлена набором упражнений, которые в свою очередь разбиты на группы со строго определенной последовательностью освоения. В процессе обучения оператор экзоскелета осваивает следующие навыки.

- Правила безопасной эксплуатации экзоскелета
- Настройка и регулировка экзоскелета
- Правильная последовательность надевания/снятия экзоскелета
- Ходьба в экзоскелете по горизонтальной и наклонной поверхностям
- Подъем/спуск по лестнице в экзоскелете
- Подъем и перенос грузов

Результаты данного исследования могут составить теоретический фундамент для построения курсов обучения эксплуатации экзоскелетов, так как прошли апробацию на группах специалистов ведущих российских и зарубежных промышленных предприятий, где методика зарекомендовала себя как эффективная.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андиева Е. Ю., Фильчакова В. Д. Цифровая экономика будущего, индустрия 4.0 // Прикладная математика и фундаментальная информатика. – 2016, № 3. С. 214...218.
2. Галин Р.Р., Серебрянный В.В., Тевяшов Г.К., Широкий А.А. Взаимодействие человека и робота в коллаборативных робототехнических системах // Изв. Юго-Западного государственного университета. – 2020;24(4):180-199. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-180-199>
3. Экзоскелеты: анализ конструкций, принципы создания, основы моделирования [Электронный ресурс] : монография : в 2-х ч. / С. Ф. Яцун [и др.]. - Курск : Университетская книга, 2015. Ч. 1. - 178, [1] с. - Библиогр.: с. 163-178.
4. Anam K., Al-Jumaily A.A. Active exoskeleton control systems: State of the art //Procedia Engineering. – 2012. V. 41. P. 988...994.
5. Bogue R. Exoskeletons and robotic prosthetics: a review of recent developments //Industrial Robot: an international journal. – 2009.
6. De Looze M. P. et al. Exoskeletons for industrial application and their potential effects on physical work load //Ergonomics. – 2016. V. 59, №. 5. P. 671...681. doi: 10.1080/00140139.2015.1081988
7. Voilqué A. et al. Industrial exoskeleton technology: classification, structural analysis, and structural complexity indicator //2019 Wearable Robotics

Association Conference (WearRAcon). – IEEE, 2019. P.13...20.

8. Robert B. Robotic exoskeletons: a review of recent progress [J] //Industrial Robot: An International Journal. – 2015. V. 42, №. 1. P. 5...10. doi: 10.1108/IR-08-2014-0379

9. Huysamen K. et al. Assessment of an active industrial exoskeleton to aid dynamic lifting and lowering manual handling tasks //Applied ergonomics. – 2018. V.68. P. 125...131.

10. Walsh C. J., Endo K., Herr H. A quasi-passive leg exoskeleton for load-carrying augmentation //International Journal of Humanoid Robotics. – 2007. V. 4, №. 03. P. 487...506. doi: 10.1142/S0219843607001126

11. Яцун С.Ф. и др. Экзоскелеты. Управление движением экзоскелета нижних конечностей при ходьбе [Электронный ресурс]; Юго-Зап. гос. ун-т. - Электрон. текстовые дан. (4777 КБ). – Курск : Университетская книга, 2016. С. 179...189.

12. Корневский Н.А. и др. Экзоскелет с биотехнической обратной связью для вертикализации пациентов //Медицинская техника. – 2017, №. 3. С.48...51.

13. Логинов Н.Ю. и др. Образовательная модель проектно-ориентированной подготовки молодых специалистов инженерно-технических направлений в концепции индустрия 4.0 //Инженерное образование. – 2018, №. 23. С. 77...82.

14. Яцун С.Ф., Антипов В.М., Карлов А.Е., Аль Манджи Хамил Хамед М. Подъем груза в экзоскелете с гравитационной компенсацией // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2019;23(2):8-17. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-2-8-17>

REFERENCES

1. Andieva E. Yu., Filchakova V. D. Digital economy of the future, industry 4.0 // Applied mathematics and fundamental informatics. – 2016, no. 3. P.214...218.

2. Galin R.R., Serebrenny V.V., Tevyashov G.K., Shirokiy A.A. Human-Robot Interaction in Collaborative Robotic Systems // Izv. Southwestern State University. – 2020;24(4):180-199. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-180-199>

3. Exoskeletons: analysis of structures, principles of creation, basics of modeling [Electronic resource]: monograph: in 2 parts / S. F. Yatsun [and others]. - Kursk:

University book, 2015.Ch. 1. - 178, [1] p. - Bibliography: p. 163-178.

4. Anam K., Al-Jumaily A.A. Active exoskeleton control systems: State of the art // Procedia Engineering. – 2012. V. 41. P. 988...994.

5. Bogue R. Exoskeletons and robotic prosthetics: a review of recent developments // Industrial Robot: an international journal. – 2009.

6. De Looze M. P. et al. Exoskeletons for industrial application and their potential effects on physical work load // Ergonomics. - 2016. V. 59, №5. P. 671...681. doi: 10.1080/00140139.2015.1081988

7. Voilque A. et al. Industrial exoskeleton technology: classification, structural analysis, and structural complexity indicator //2019 Wearable Robotics Association Conference (WearRAcon). – IEEE, 2019. P.13...20.

8. Robert B. Robotic exoskeletons: a review of recent progress [J] // Industrial Robot: An International Journal. – 2015. V. 42, no. 1. P. 5...10. doi: 10.1108/IR-08-2014-0379

9 Huysamen K. et al. Assessment of an active industrial exoskeleton to aid dynamic lifting and lowering manual handling tasks //Applied ergonomics. – 2018. V.68. P. 125...131.

10. Walsh C. J., Endo K., Herr H. A quasi-passive leg exoskeleton for load-carrying augmentation // International Journal of Humanoid Robotics. – 2007. V. 4, №03. P. 487...506. doi:10.1142/S0219843607001126

11. Yatsun S.F. etc. Exoskeletons. Movement control of the exoskeleton of the lower limbs when walking [Electronic resource]; Southwest state un-t. - Electron. text data. (4777 KB). - Kursk: University book, 2016. P.179 ... 189.

12. Korenevsky N.A. and other Exoskeleton with biotechnical feedback for the verticalization of patients //Medical equipment. – 2017, no. 3. P.48...51.

13. Loginov N.Yu. and others. Educational model of project-oriented training of young specialists in engineering and technical areas in the concept of industry 4.0 // Engineering education. – 2018, № 23. P. 77...82.

14. Yatsun S.F., Antipov V.M., Karlov A.E., Al Manji Hamil Hamed M. Lifting a load in an exoskeleton with gravitational compensation. Bulletin of the Southwestern State University. – 2019;23(2):8-17. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-2-8-17>

Рекомендована кафедрой механики, мехатроники и робототехники. Поступила 08.12.21.