

ФАКТОРЫ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ НА РОССИЙСКИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Ирина Вадимовна Ершова¹,
eiv.eorm@e1.ru
Ольга Олеговна Подоляк¹,
eltcha@mail.ru
Андрей Викторович Данилов²
dav.82@mail.ru

¹Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина
Россия, Екатеринбург
²Компания FANUC (Fanuc Corporation)
Россия, Москва

Актуальность исследования обусловлена отсутствием методических проработок по оценке эффективности внедрения роботизированных комплексов (РТК) в условиях роста применения роботов в долгосрочной перспективе.

Цель выполненного исследования – обоснование системы факторов, определяющих эффективность внедрения робототехнических комплексов на российских предприятиях. В статье рассмотрены факторы эффективности «точечного» внедрения роботизированных комплексов на российских промышленных предприятиях в рамках малобюджетных проектов. Выборку исследования составили 10 предприятий, внедривших роботизированное оборудование FANUC, и успешно эксплуатирующих его более года. На основании экспертного опроса специалистов предприятий был получен ранжированный список факторов эффективности: повышение производительности, повышение качества, снижение расходов на оплату труда, ликвидация опасных операций и гибкость производства. Построена корреляционно-регрессионная модель зависимости годовой экономии от выбранных факторов. После проверки факторов на взаимозависимость в модели осталось 4 фактора: повышение производительности (расходов на оплату труда); сокращение брака (повышение качества); вредность работ; разряд работ до внедрения. Проведено сравнение факторов эффективности внедрения комплексов, полученных экспертным опросом специалистов предприятий и методами корреляционно-регрессионной зависимости. По экспертным оценкам, основным фактором является «рост производительности», однако расчеты показали, что на первое место попадает фактор «снижение брака». Для единичного внедрения робототехнических комплексов рост производительности лимитируется пропускной способностью смежных операций, а снижение брака дает ощутимый экономический эффект.

Результаты выполненных исследований показывают, что наибольшая эффективность РТК обеспечивается в тех случаях, когда возникает необходимость снижения уровня брака. На рутинных простых операциях брак может быть снижен в два раза и более, что следует учитывать специалистам, внедряющим РТК и оценивающим их потенциальную эффективность.

Ключевые слова: робототехнические комплексы; тенденции; эффективность; оценка; факторы.

Введение
По данным Международной Федерации Роботов (International Federation of Robotics, далее IFR) [1], в мире установлено более 1,4 млн промышленных роботов. Тем не менее потенциал внедрения далеко не исчерпан и может быть увеличен в несколько раз. Бостон Консалтинг Групп (Boston Consulting Group, далее BCG) [2] оценивает ежегодный прирост установок роботов в 10 % в течение ближайшего десятилетия.

В соответствии с нормальным прогнозом ежегодные отгрузки роботов вырастут с 200 000 (данные по 2014 г.) до 500 000 к 2025 г., а в соответствии с более агрессивным сценарием – до 700 000. Аналитики BCG предсказывают, что при этих цифрах емкость глобального рынка и различных технологических применений будет заполнена лишь на четверть. В долгосрочной перспективе рост применений роботов будет только увеличиваться.

Такой глобальный тренд диктует свои условия игры и влияет на развитие отрасли робототехники в целом. Ближится переломный момент, когда промышленная робототехника и решения на ее основе станут обыденным стандартом для большинства предприятий во всех отраслях промышленности [3–5].

Можно выделить три основных фактора, которые максимально способствуют наступлению такого переломного момента. **Первый** – повышение экономической эффективности роботов по отношению к человеческому труду. Современные промышленные роботы отвечают критерию интеллектуальности, т. е. обладают рядом функций, делающих их внедрение простым и эффективным. Их количество близится к десяткам и сотням у разных производителей. Кроме того, эффективности способствует снижение стоимости разных компонентов и элементов систем. Так, например, стоимость программного обеспечения снизилась более чем на 40 % за последние 10 лет. Аналогично снизилась стоимость инженерных работ и периферийного оборудования, используемого в РТК. **Второй** – внедрение в РТК таких технологических преимуществ, которые позволят эффективно внедрять роботов в ключевых отраслях промышленности. Прежде всего, речь идет о коллаборативных технологиях, мобильных роботах, расширяющих стандартные границы и области внедрения роботов. **Третий** – распространенность бюджетных и простых в эксплуатации роботизированных систем, доступных небольшим предприятиям. Основной движущей силой этого направления являются как новые производители инновационных роботизированных систем (UR, Rethink, Baxter), так и мировые гиганты (Fanuc, Yaskawa, ABB) предлагающие рынку бюджетные модели роботов с низким сроком окупаемости.

В то же время динамика внедрения роботов на российских промышленных предприятиях значительно отстает от мировой [6]. Это связано, прежде всего, с организационно-экономическими условиями производства. Среднее отставание часовой ставки рабочего в России в 4 раза от аналогичного показателя развитых стран замедляет процесс окупаемости роботизации. С другой стороны, существует группа технических ограничений, определяемая уровнем смежных технологий и организации производства.

В связи с последним условием в процессе исследований была поставлена цель обоснования факторов эффективности внедрения робототехнических систем как комплексного продукта.

Тенденции внедрения роботизированных технологических комплексов (РТК)

Роботизированный технологический комплекс (РТК) – совокупность промышленного робота как элемента производственной системы, основного технологического оборудования, вспомогательного оборудования и устройств, рас-

ширяющих эксплуатационные возможности робота по общей программе в конкретных производственных условиях. Похожие взгляды на определение РТК приведены также в [7, 8]. Существует множество классификационных признаков РТК, и ряд авторов приводят свои взгляды на классификацию РТК [9–11].

Согласно промышленному классификатору ISIC (International Standard Industrial Classification – Международный Стандарт Промышленной Классификации) версии 4, в качестве основной предлагается классификация промышленных роботов по применению:

- перемещение (разгрузка/ загрузка, упаковка, укладка и др.);
- сварка (дуговая, контактная, лазерная, пайка и др.);
- нанесение (покраска, грунтовка и др.);
- обработка (резка, гидрорезка, механическая обработка, полировка и др.);
- сборка (вставка, разборка и др.).

Анализ РТК по применению позволяет выделить основные мировые и российские тенденции, оценить степень их совпадения. В развитых странах, выбранных в качестве эталона сравнения (Германия, Италия, Франция), доля РТК по направлению «перемещение» составляет более 50 % от всех внедренных. Следующим видом по частоте внедрения идет направление «сварка» (30 % и более). В России тенденция обратная: более 40 % РТК внедрены по направлению «сварка» и около 30 % – по направлению «перемещение». Преобладание сварочных роботов над применением «перемещение», по мнению авторов, носит временный характер. Объясняется это, прежде всего, тем, что именно со сварочных применений (низкий срок окупаемости) началось формирование рынка роботизированных решений в России [12]. Согласно внутренней статистике продаж промышленных роботов FANUC, начиная с 2015 г. виден тренд на увеличение продаж роботов по направлениям: работа со станком, паллетирование, перемещение, которые входят в состав группы «перемещение». Многие предприятия в стране способны внедрять разработку, производство и поставку необходимого оборудования.

Экспертная оценка факторов эффективности РТК на российских предприятиях

Проблема оценки эффективности РТК возникла еще с появлением автоматизированной системы управления (АСУ). Первые методические разработки появились в 1965–1969 гг. Впоследствии были опубликованы: «Методы и практика определения эффективности капитальных вложений и новой техники» [13]; «Методика определения экономической эффективности АСУ производством» [14]; «Методика оценки эффективности промышленных роботов» [15].

Для проведения исследования был предложен дополнительный классификационный признак РТК – по степени затратности проектов. Дополнительно к предлагаемым классификационным признакам (по назначению, степени участия человека, степени перемещения и т. п.) предлагается выделять РТК, реализуемые в рамках низко- и среднебюджетных сегментов и в рамках крупных инвестиционных проектов.

Такое деление обусловлено тем, что большие инфраструктурные проекты (например, запуск завода концерна VW в Калуге, более 200 роботов и т. п.) требуют огромных инвестиций, задействуют политические и экономические интересы разных групп, а также оказывают влияние на развитие области и региона в целом. Проекты такого уровня оцениваются по специфическим критериям и методикам, а зачастую могут приниматься по «политической воле». В России большинство внедрений РТК – из низко- и среднебюджетных сегментов. В денежном эквиваленте – это суммы от 40 до 300 тыс. евро. Это обусловлено, прежде всего, состоянием промышленности и общей культуры производства в нашей стране. В дальнейшем будем рассматривать примеры реализованных проектов именно из этого ценового диапазона.

С целью выявления факторов эффективности внедрений РТК, актуальных для российских предприятий, был проведен анкетный опрос компаний с последующим ранжированием экспертных оценок. Выборку исследования составили 10 предприятий, внедривших роботизированное оборудование FANUC и успешно эксплуатирующих его более года. Выбор экспертов осуществлялся среди предприятий, осуществляющих интеграцию и запуск роботизированного оборудования FANUC на промышленных предприятиях России. От каждой компании был выделен эксперт уровня «главный инженер» или «технический директор». Компании имеют свои наработки по работе с производственниками и в большинстве случаев предоставляют опросные листы для заполнения конечному клиенту.

Согласно опыту и пониманию рынка экспертами, им было предложено оценить пять основных факторов, влияющих на эффективность внедрения РТК на промышленных предприятиях России. Число факторов $n = 5$, число экспертов $m = 9$. Оценку степени значимости параметров эксперты производят путем присвоения им рангового номера. Фактору, которому эксперт дает наивысшую оценку, присваивается ранг 1. Если эксперт признает несколько факторов равнозначными, то им присваивается одинаковый ранговый номер. Результаты экспертного опроса приведены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, первоочередным фактором у экспертов является повышение производительности, далее – повышение качества, сокращение персонала, ликвидация опасных операций и повышение гибкости производства.

Таблица 1. Экспертные оценки факторов эффективности роботизации производства.
Table 1. Expert evaluations of manufacture robotization efficiency factors.

Факторы	Эксперты									Сумма рангов
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Сокращение расходов на оплату труда	3	2,5	3,5	4	1,5	2	2	4	5	27,5
Повышение качества	5	5	5	2	3	3	5	3	4	35,0
Ликвидация опасных операций	1	2,5	1	3	4	4	4	2	2	23,5
Повышение производительности	4	4	3,5	5	5	5	3	5	3	37,5
Повышение гибкости производства	2	1	2	1	1,5	1	1	1	1	11,5

Каждый руководитель принимает решение относительно того, что считать критерием эффективности на своем производстве при внедрении нового оборудования. Причем определяющим моментом является специфика технологического процесса, реализуемого на предприятии. Так, предприятия, связанные с оборонно-промышленным комплексом, ставят во главу угла фактор качества. Это определяется, во-первых, высокой стоимостью изготовления детали и недопустимостью брака изделия, во-вторых, высочайшими требованиями по ответственности за качество продукции. Никто не ориентируется на высокую производительность, если программа выпуска таких изделий – единицы штук в месяц или год. Решение об инвестировании в РТК происходит из соображений стабильности процесса, 100 %-ного контроля, высокого уровня качества и минимизации человеческого фактора. Для предприятий, работающих с автозаводами или выпускающих изделия крупными сериями, приоритетной является исключительно производительность, затем идет качество [16].

Корреляционно-регрессионная модель влияния частных факторов на эффективность внедрения РТК

Следующим этапом работы была проверка выделенных экспертных факторов на соответствие методам корреляционно-регрессионного анализа. Для анализа были выбраны 10 предприятий, внедривших РТК в период с 2014 по 2016 г. (табл. 2). Все они относятся к малобюджетным проектам различных отраслей промышленности, не связанных с автомобилестроением и оборонно-промышленным комплексом.

Функцией Y была выбрана экономия от внедрения РТК, рассчитанная в млн руб. как разность между приведенными затратами по ручному варианту и роботизированному варианту согласно методикам [13]. Поскольку выбранные предприятия уже эксплуатируют данные комплексы, то расчетная экономия являлась фактически достигнутой, а не плановой. В качестве зависимых факторов X_i , определяющих выбранную функцию Y , были рассмотрены факторы, предложенные экспертами:

- X_1 – повышение производительности;
- X_2 – сокращение брака (повышение качества);
- X_3 – сокращение основных рабочих;
- X_4 – вредность работ;
- X_5 – разряд работ до внедрения;
- X_6 – устойчивость (отклонение объема от точки безубыточности).

После проверки факторов на взаимовлияние методом парной корреляции для построения модели были выбраны следующие 4 фактора:

- X_1 – повышение производительности (расходов на оплату труда), %;
- X_2 – сокращение брака (повышение качества), %;
- X_4 – вредность работ, абсолютное изменение уровня вредности;
- X_5 – разряд работ до внедрения;

В табл. 3 приведена информация для расчетов.

Таблица 2. Список исследуемых РТК.

Table 2. The list of robotic complexes under study.

№ п/п	Применение	Бюджет РТК	Год покупки РТК
1	Дуговая сварка	5,86	2014
2	Дуговая сварка	12,20	2014
3	Дуговая сварка	21,35	2015
4	Перемещение	12,20	2016
5	Перемещение	13,42	2014
6	Перемещение	18,30	2015
7	Разгрузка/загрузка	3,90	2016
8	Разгрузка/загрузка	7,32	2016
9	Разгрузка/загрузка	3,66	2016
10	Покраска	3,42	2016

Таблица 3. Исходные данные для выявления корреляции факторов.

Table 3. Initial data for correlation factors placement.

Номер наблюдения	Зависимая переменная		Объясняющие переменные			
	Y ,	X_1	X_2 ,	X_4	X_5	
1	1	2	3	5	6	
1	0,65	2	0,15	-3	2	
2	0,42	2	0,86	-3	2	
3	0,06	4	1,08	-3	2	
4	10	5	10,32	-1	3	
5	-0,48	4	0,25	-1	3	
6	-0,82	4	0,40	-2	3	
7	0,01	2	0,08	-2	3	
8	1,17	2	1,35	-3	3	
9	0,05	1	0,27	-1	3	
10	0,13	1	0,23	-3	2	

Для расчета была выбрана линейная функция.
Полученная модель имеет следующий вид:

$$Y = 6,17 + 2,86 X_1 - 20,48 X_2 - 2,4 X_3 - 2,4 X_4.$$

Модель удовлетворяет критерию Фишера и может считаться достоверной.

В табл. 4 приведено сравнение полученных экспертных оценок и коэффициентов значимости факторов согласно модели.

Таблица 4. Факторы эффективности внедрения РТК.
Table 4. Efficiency factors for adoption of robotic complexes.

Факторы	Сумма рангов	Коэффициент значимости
Повышение производительности	37,5	2,86
Повышение качества	35	20,48
Сокращение расходов на оплату труда	27,5	–
Снижение разряда работ	–	2,40
Ликвидация опасных операций	23,5	2,40
Повышение гибкости производства	11,5	–

Заключение

Из полученных результатов, следует, что наибольшую эффективность РТК показывают в ситуациях, когда необходимо снизить уровень брака, обеспечить стабильность производственных процессов. Для единичного внедрения робототехнических комплексов рост производительности лимитируется пропускной способностью смежных операций, а снижение брака на простых операциях (на некоторых в два раза и более) дает ощутимый экономический эффект. Это необходимо учитывать специалистам предприятий, выбирающим РТК и определяющим его потенциальную эффективность. Более точные результаты могут быть получены при расширении массива первичной информации, группировки РТК по применению и группировки предприятий по отраслям. В настоящее время авторы продолжают работу по сбору информации для выявления факторов эффективности в различных производственных условиях и построения уточненных моделей.

ЛИТЕРАТУРА

- IFR Statistical Department: World of Robotics 2015. Industrial robots. URL: <http://www.worldrobotics.org>
- Boston Consulting Group: The Robotics Revolution. URL: <http://www.bcg.com>
- Zheng L., Liu S., Wang S. Current situation and future of chinese industrial robot development // International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research. 2016. Vol. 5, Issue 4. P. 295–300.
- Luo M., Fang J., Zhao J. The development and the application of the industrial robot technology // Machine Building Automation. 2015. Vol. 44, no. 1. P. 1–4.
- Ren Z. The present situation and development trend of industrial robot // Equipment Manufacturing Technology. 2015. No. 3. P. 166–168.
- Комков Н. Н., Бондарева Н. Н. Перспективы и условия развития робототехники в России // Модернизация. 2016. № 1. С. 8–21.
- Industrial robots definition and classification. URL: https://ifr.org/img/office/Industrial_Robots_2016_Chapter_1_2.pdf
- Козловский В. А. Организационные и экономические вопросы построения производственных систем. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1981. 281 с.
- Юревич Е. И. Интеллектуальные роботы. М.: Машиностроение, 2007. 325 с.
- Юревич Е. И. Основы робототехники. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 310 с.
- Интегральный робот / под ред. А. И. Галушкина. Сер. «Нейрокомпьютеры и их применение». Кн. 20. М.: Радиотехника, 2006. 146 с.
- Nikitin V. E., Marchenko S. A., Nesterov O. D., Mukhaev A. V. Modern tendencies in the development of automated robotics technological complexes for arc welding // Tyazheloe Mashinostroenie. 1992. Issue 7. P. 27–30.
- Методы и практика определения эффективности капитальных вложений и новой техники: сб. науч. инф. М.: Наука, 1969. Вып. 16. 128 с.
- Методика определения экономической эффективности АСУ производством. М.: ЦНИИКА, 1970. 37 с.
- Мыльник В. В. Методика оценки эффективности промышленных роботов. М.: НИИ экономики МАЛ, 1982. 41 с.
- García de Soto B., Agustí-Juan I., Hunhevicz J., Joss S., Graser K., Habert G., Adey B. T. Productivity of digital fabrication in construction: Cost and time analysis of a robotically built wall // Automation in Construction. 2018. Vol. 92. P. 297–311.
- Расчеты экономической эффективности новой техники: справочник / под общ. ред. К. М. Великанова. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1990. 448 с.

Статья поступила в редакцию 10 февраля 2018 г.

The factors of the effectiveness of introducing robotic complex at Russian enterprises

Irina Vadimovna Ershova¹,
eiv.eopm@e1.ru
Ol'ga Olegovna Podolyak¹,
eltcha@mail.ru
Andrey Viktorovich Danilov²
dav.82@mail.ru

¹Ural Federal University named after the First President
of Russia B. N. Yeltsin
Ekaterinburg, Russia
²Company FANUC (Fanuc Corporation)
Moscow, Russia

The relevance of the work is conditioned by the lack of methodological studies to assess the effectiveness of the introducing robotic complexes. The use of robots is growing in the long-term perspective.

The purpose of the work is to substantiate the system of factors determining the effectiveness of the introduction of robotic systems at Russian enterprises. The article considers the factors of efficiency of the "point" implementation of robotic systems at Russian industrial enterprises in the framework of low-budget projects. A sample of the study was made by 10 companies that have implemented robotic equipment FANUC, and successfully operating it for more than a year. Based on the expert survey of specialists of enterprises, a ranked list of efficiency factors was obtained: increased productivity, improved quality, reduced labor costs, elimination of hazardous operations and production flexibility. The correlation and regression model of the annual savings dependence on the selected factors was constructed. There are 4 factors remained after checking the factors for interdependence in the model: productivity increase (labor costs); reduction in defectives (quality improvement); harmfulness of work; category of work before implementation. The comparison of the factors of efficiency of implementation of the complexes was carried out. They were obtained by the expert survey of specialists of enterprises and methods of correlation and regression dependence. According to the expert's estimates, the main factor is "productivity growth", but calculations have shown that the factor of reduction in defectives comes first. For a single implementation of robotic systems, the growth of productivity is limited by the capacity of adjacent operations, and the reduction of marriage gives a tangible economic effect.

The results of the studies show that the highest efficiency of robotic complexes is provided in cases where there is a need to reduce the level of defects. On routine simple operations defectives can be reduced by half or more, which should be taken into account by specialists implementing robotic complexes and assessing their potential effectiveness.

Keywords: robotic complexes; trends; efficiency; evaluation; factors.

REFERENCES

1. 2015, IFR Statistical Department: World of Robotics. Industrial robots. URL: <http://www.worldrobotics.org>
2. Boston Consulting Group: The Robotics Revolution. URL: <http://www.bcg.com>
3. Zheng L., Liu S., Wang S. 2016, Current situation and future of Chinese industrial robot development. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, vol. 5, Issue 4, pp. 295–300.
4. Luo M., Fang J., Zhao J. 2015, The development and the application of the industrial robot technology. *Machine Building Automation*, vol. 44, no. 1, pp. 1–4.
5. Ren Z. 2015, The present situation and development trend of industrial robot. *Equipment Manufacturing Technology*, no. 3, pp. 166–168.
6. Komkov N. N. Bondareva N. N. 2016, *Perspektivy i usloviya razvitiya robototekhniki v Rossii* [Prospects and conditions of development of robotics in Russia]. *Modernizatsiya* [Modernization], no. 1, pp. 8–21.
7. Industrial robots' definition and classification. URL: https://ifr.org/img/office/Industrial_Robots_2016_Chapter_1_2.pdf
8. Kozlovsky V. A. 1981, *Organizatsionnyye i ekonomicheskiye voprosy postroyeniya proizvodstvennykh sistem* [Organizational and economic issues of production systems construction]. Leningrad, 281 p.
9. Yurevich E. I. 2007, *Intellektual'nyye roboty* [Intelligent robots]. Moscow, 325 p.
10. Yurevich E. I. 2005, *Osnovy robototekhniki* [Fundamentals of robotics]. Saint Petersburg, 310 p.
11. 2006, *Integral'nyy robot. Pod red. A. I. Galushkina. Seriya «Neyrokomp'yutery i ikh primeneniye»*. Kniga 20 [Integrated robot. Ed. by A. I. Galushkin. "Neurocomputers and their applications" series. Book 20]. Moscow, 146 p.
12. Nikitin V. E., Marchenko S. A., Nesterov O. D., Mukhaev A. V. 1992, Modern trends in the development of automated robotics technological complexes for arc welding. *Tyazheloe Mashinostroyeniye*, issue 7, pp. 27–30.
13. 1969, *Metody i praktika opredeleniya effektivnosti kapital'nykh vlozheniy i novoy tekhniki: sb. nauch. inf.* [Methods and practice of determining the effectiveness of capital investments and new equipment: a collection of scientific information]. Issue 16. Moscow, 128 p.
14. 1970, *Metodika opredeleniya ekonomicheskoy effektivnosti ASU proizvodstvom* [The method of determining the economic efficiency of ACS production]. Moscow, 37 p.
15. Myl'nik V. V. 1982, *Metodika otsenki effektivnosti promyshlennykh robotov* [The methods of evaluating the effectiveness of industrial robots], Moscow, 41 p.
16. García de Soto B., Agustí-Juan I., Hunhevicz J., Joss S., Graser K., Habert G., Adey B. T. 2018, Productivity of digital fabrication in construction: Cost and time analysis of a robot built wall. *Automation in Construction*, vol. 92, pp. 297–311.
17. 1990, *Raschyoty ekonomicheskoy effektivnosti novoy tekhniki: spravochnik. Pod obshch. red. K. M. Velikanova* [Calculations of economic efficiency of new equipment: A Handbook. Ed. by K. M. Velikanov]. Leningrad, 448 p.

The article was received on February 10, 2018