

## ИНФОРМАЦИОННОЕ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 62-52

[https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2\(47\)-64-71](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2(47)-64-71)

Ефимов А.Ю., Горькавый М.А., Соловьев В.А.

Комсомольский-на-Амуре государственный университет

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ  
ПРОМЫШЛЕННОГО РОБОТА В ЗАДАЧАХ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ  
АВТОМАТИЗИРОВАННЫМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ**

В работе представлен подход, обеспечивающий возможность идентификации нелинейных зависимостей энергопотребления промышленного робота, входящего в состав автоматизированного технологического процесса, посредством использования нейро-нечетких моделей. Экспериментально подтверждено наличие существенных различий в значениях мгновенной мощности энергопотребления робота в зависимости от состояния его осей, что, в свою очередь, определяет потенциал энергосбережения при реализации возможности выбора наименее энергозатратных зон рабочей области робота при формировании управляющей программы. Была выполнена комплексная процедура измерений и сформирован массив данных мгновенных значений мощности и соответствующих значений координат шестой оси робота. На базе обучающей выборки посредством инструментов интеллектуальных нейро-нечетких систем была сформирована модель энергопотребления промышленного робота, позволяющая спрогнозировать энергетические затраты при выполнении конкретной управляющей программы технологического процесса. Подробно описаны параметры полученной нейро-нечеткой системы и также алгоритмы, реализуемые в ее подсистемах. На основании результатов репрезентативного тестирования модели во всей рабочей зоне промышленного робота и соотнесения с данными, полученными с измерительных устройств, в рамках проведения эксперимента продемонстрирована возможность существенного сокращения энергетических затрат в пределах 7–15 %. Обозначены пути интеграции предложенных инструментов управления в производственные процессы промышленного предприятия, а также определены задачи перспективных исследований.

**Ключевые слова:** автоматизация, робототехника, энергосбережение, роботизированные процессы, оптимизация, управление.

**ВВЕДЕНИЕ**

На современном этапе развития промышленности роботизированные технологические комплексы позволяют значительно ускорить производство готовых и промежуточных изделий. Промышленные роботы, обладая рядом преимуществ по сравнению со станками ЧПУ, с каждым годом завоевывают все больше и больше сегментов производства, таких как: сборка, покраска, сварка, клепка, перемещение грузов, механообработка и др. При этом одним из основных ресурсов во всех сегментах роботизированного производства является электроэнергия.

Если отдельно взятый промышленный робот автономно является энергоэффективным устройством [1, 2] под управлением оптимальных, в том числе по критерию энергосбережения, алгоритмов, то организованный на базе роботов любой производственный процесс имеет значительный потенциал энергосбережения [3, 4].

Как правило, алгоритмы управления составляющими робота как автономного устройства являются недоступными для конечного пользователя (промышленного предприятия) и представляют собой коммерческую тайну производителя. В этом направлении реализация потенциала энергосбережения для пользователя закрыта, он может лишь полагаться только

на компетентность проектировщиков робототехнического оборудования.

В то же самое время пользователь, обладая возможностью организации процесса проектирования роботизированных ячеек и локального оборудования технологического комплекса на своем предприятии, имеет широкий спектр возможностей по повышению энергоэффективности процесса в целом. Это может быть достигнуто за счет реализации оптимальных решений в части конфигурирования роботизированных ячеек, реализующих определенный класс технологических операций, а также внесения оперативных корректировок в управляющие программы исполнительных механизмов. Оба «организационных» пути сокращения электропотребления позволяют уменьшить удельный вес электроэнергии в себестоимости конечной продукции, но в первом случае (статическое позиционирование оборудования) мероприятие носит разовый характер и возможно только на этапе наладки роботизированной ячейки, ее повторная трансформация является оправданной, если технологический процесс меняется кардинально. Оперативная же коррекция управляющих программ под каждую технологическую операцию не связана с привлечением дополнительных ресурсов и позволяет добиться положительного эффекта. При этом аппаратная часть роботизированного комплекса задействуется только один раз для идентификации процесса, в дальнейшем все операции по поиску оптимального решения вы-

полняет программная часть в виртуальном пространстве технологического процесса.

# ПРОЦЕДУРА ФОРМИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО РОБОТА

В работах авторов [5-7] были представлены промежуточные результаты исследования, ставивших перед собой цели минимизации (формула (1)) электропотребления роботизированного процесса в условиях ограничений на значения основных параметров технологического процесса, например: время изготовления детали, скорость подачи инструмента, масса оснастки и т.д.

$$F = \min(W), \lim(v, t), \quad (1)$$

где  $W$  – потребленная энергия;  $v$  – скорость перемещения манипулятора;  $t$  – время выполнения технологической операции.

Решалась задача поиска оптимального (с точки зрения энергоэффективности) положения заготовки в рабочем пространстве робота.

Так, только за счет оптимизации пространственного положения обрабатываемого изделия в рамках процесса механообработки материалов с твердостью не более 32 кгс/мм<sup>2</sup> по Бринеллю (в эксперименте не проводились исследования по механообработке материалов с твердостью свыше 32 кгс/мм<sup>2</sup> в силу ограничений по функциональности имеющегося роботизированного оборудования) наблюдался потенциал экономии электропотребления до 15%. Эксперимент проводился в соответствии с параметрами, представленными в табл. 1.

На основе эмпирических данных есть все основания полагать, что потенциал энергосбережения, заложенный в возможности автоматизированного поиска оптимального положения изделия в пространстве, в задачах механообработки материалов с твердостью свыше 32 кгс/мм<sup>2</sup>, а также в других технологических процессах, связанных с перемещением руки робота на высоких скоростях, может составлять до 30-40%, что подтверждается результатами исследований, отраженных в работах [5, 8].

Несмотря на значительный эффект от оптимизационных действий приведенного выше примера, данный результат не гарантирован на всем множестве роботизированных процессов, поскольку не во всех технологических операциях роботов есть возможность изменения положения подпространства комплекса траекторий движений (совокупность движений манипулятора, реализуемых в ходе выполнения управляющей программы) относительно глобальной системы координат робота, в других эта возможность ограничена исполнительными устройствами, например рабочий ход осей позиционного стола или вспомогательного робота, осуществляющего захват и удержание обрабатываемой детали.

Таблица 1

Параметры технологического процесса

| Параметр технологического процесса              | Значение параметра   |
|---|--|
| Тип механообработки                             | Фрезерование   |
| Материал  | Сплав алюминия (твердость 28 кгс/мм <sup>2</sup> )                   |
| Тип изделия                                     | Фланец приварной   |
| Основной исполнительный механизм                | KUKA KR – 60<br>Грузоподъемность – 60 кг<br>Радиус рабочий – 2052 мм |
| Скорость подачи инструмента                     | 1200 мм/мин.   |
| Средняя мгновенная мощность робота без шпинделя | 1,25 кВт   |

Для того чтобы гарантировать достижение положительного эффекта в условиях имеющихся ограничений, необходимо реализовать следующую последовательность действий.

Этап 1: автоматизированная оценка потенциала энергосбережения конкретного роботизированного процесса в случае оптимизации подпространства комплекса траекторий движения робота в пространстве рабочей области.

Этап 2: автоматизированная идентификация нелинейных зависимостей электропотребления экземпляра конкретного класса промышленных роботов от положения его осей и скорости подачи.

Этап 3: моделирование электропотребления роботом при изменении начальной точки системы координат изделия относительно глобальной системы координат робота (сдвига подпространства траекторий движения робота). Поиск оптимального положения изделия в пространстве рабочей области робота.

В данной статье предлагаются варианты решения вопросов второго и частично третьего этапов. Синтез алгоритмов автоматизированного решения задач первого этапа целесообразно проводить в рамках исследования после получения экспериментальных результатов второго и третьего этапов во взаимосвязи с параметрами надпроцессов роботизированного участка (производственные процессы промышленного предприятия), например, объем производства, номенклатура продукции, возможный процент брака и т.п.

Приведенные ниже результаты исследований базируются и адекватны для роботизированного процесса механообработки изделий, при этом применимость данного подхода не исключается для технологических процессов, для которых характерны малые перемещения высокой плотности на низких скоростях подачи. В остальных случаях необходимо доопределять процедуру идентификации нелинейных зависимостей получения траекторий-шаблонов.

Для обеспечения возможности поиска оптимального расположения комплекса траекторий необходимо иметь информацию о мощности, потребляемой роботом при нахождении его инструмента в том или

ином сегменте пространства. Получение точных и достоверных данных представляется возможным только путем проведения измерений мощности на конкретном промышленном роботе. Для этого была разработана процедура по измерению потребляемой мощности в различных сегментах пространства [6].

Измерения проводились в подпространстве рабочей области робота, ограниченной кубом со стороной 1000 мм, которое располагалось напротив главной оси робота в глобальной системе координат (декартовой системе координат, начальная точка которой находится в основании робота [5, 6]); координаты вершин куба:  $a$  (800,500,800),  $b$  (1800,500,800),  $c$  (1800,-500,800),  $d$  (800,-500,800),  $e$  (800,500,1800),  $f$  (1800,500,1800),  $g$  (1800,-500,1800),  $h$  (800,-500,1800).

Подпространство условно разделено на горизонтальные слои толщиной 100 мм, где каждый слой состоит из базовых сегментов – кубов со стороной 100 мм. Математически изучаемую область можно представить в виде многомерного массива  $P$  размерностью  $j, k, m = 10$ . Схематичное изображение области измерений, разделённой на базовые сегменты пространства, показано на **рис. 1**.

В программном обеспечении Sprut Cam для робота KUKA KR 60 была сформирована управляющая программа, состоящая из 450 перемещений типа LIN и CIRC (линейные движения по прямой и движения по окружности) [9, 10], характерных для механообработки и не выходящих за рамки установленного базового сегмента (куба с ребром 100 мм).

Для определения мощности в разрыв силового кабеля питания робота и его управляющего контроллера было подключено измерительное устройство регистрации фазных токов трехфазной сети, собранного на базе трансформаторов тока Talema AC1030 и платы Arduino Nano, передающей на ЭВМ мгновенные значения потребляемой мощности в определенные промежутки времени (дважды в секунду).

Управляющая программа была тиражирована для всех 1000 сегментов и последовательно запущена на исполнение промышленным роботом. При этом навесное оборудование на роботе отсутствовало.

После проведения серии измерений была реализована процедура агрегации и найдены значения средней потребленной мощности для каждого сегмента подпространства по формуле (2), результаты которой представлены на **рис. 2**.

$$P(j, k, m) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{\phi} (I_{i,1}^{j,k,m} + I_{i,2}^{j,k,m} + I_{i,3}^{j,k,m}), \quad (2)$$

где  $P(j, k, m)$  – среднее значение потребляемой мощности роботом в базовом сегменте подпространства с индексами  $(j, k, m)$ ;  $n$  – число измерений;  $I_{i,1}^{j,k,m}, I_{i,2}^{j,k,m}, I_{i,3}^{j,k,m}$  – зафиксированные значения фазных токов каждой из трех фаз в рамках сегмента с индексами  $(j, k, m)$ ;  $U_{\phi}$  – фазное напряжение (220 В).

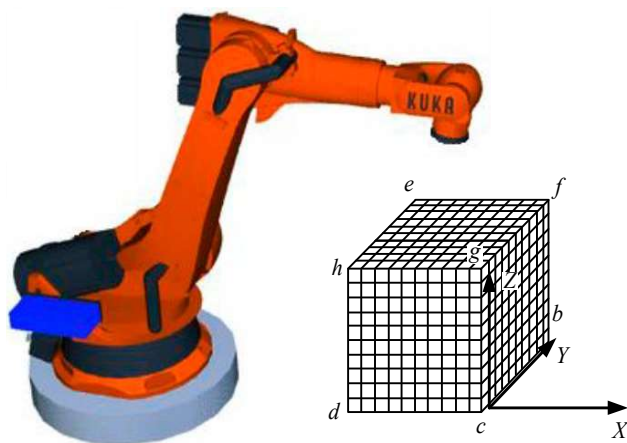


Рис. 1. Схематичное изображение области измерений

Результаты исследований, визуализированные на **рис. 3**, демонстрируют области как наиболее энергозатратные, так и наоборот – обеспечивающие минимальное потребление промышленного робота. Результаты дают предпосылки для формирования алгоритма управления роботом с целью реализации выбора оптимальных траекторий движения и снижению общих затрат электрической энергии.

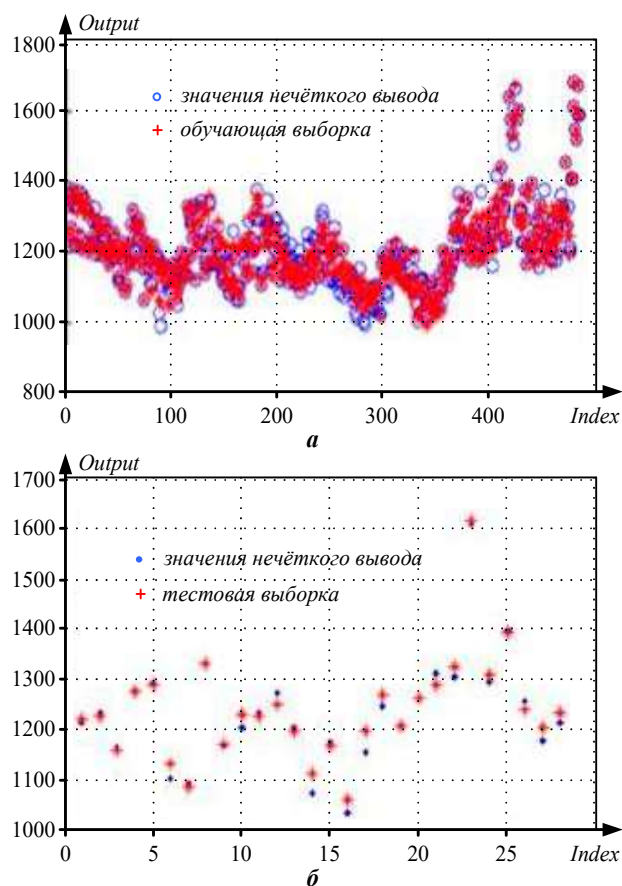


Рис. 2. Результаты нечеткого логического вывода: а – обучающая выборка; б – тестовая выборка

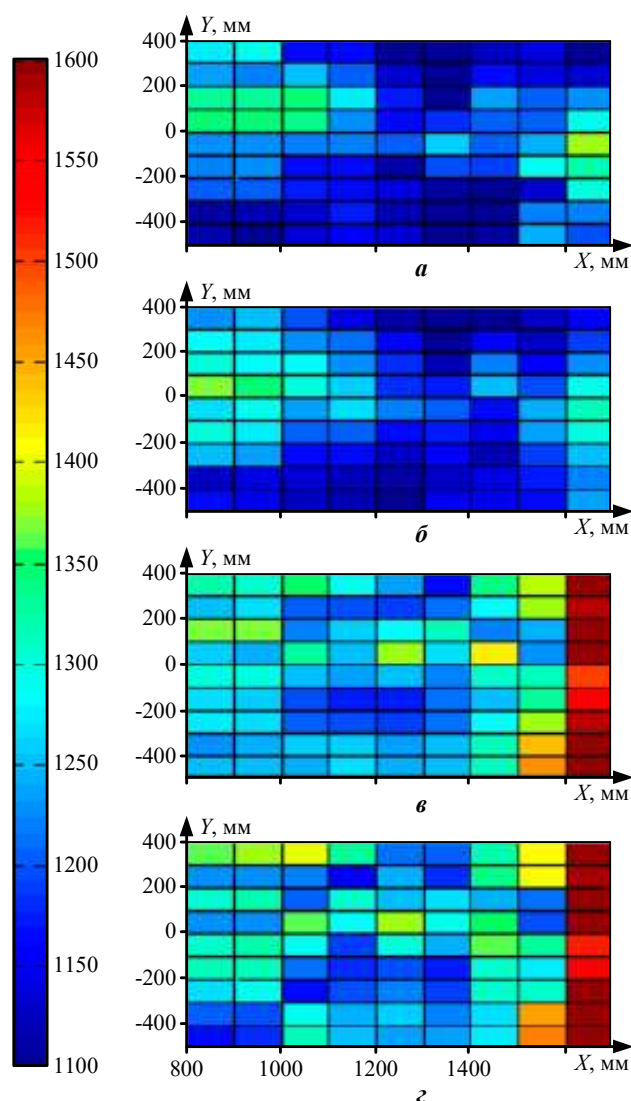


Рис. 3. Контурные графики, полученные в результате проведения измерений значений мощности: *a* – слой на высоте 1100 мм, *б* – слой на высоте 1200 мм, *в* – слой на высоте 1500 мм, *г* – слой на высоте 1600 мм

#### НЕЙРО-НЕЧЕТКИЙ ПОДХОД ИДЕНТИФИКАЦИИ НЕЛИНЕЙНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО РОБОТА

Для получения эмпирической зависимости энергопотребления робота от траектории движения (этап 3 – моделирования энергопотребления роботом) целесообразен перевод полученного массива дискретных данных ( $P$ ) в непрерывную функцию. Для этого было принято решение использовать инструмент адаптивной нейро-нечеткой системы вывода [11-13] с помощью встроенной функции ANFIS среды MATLAB. На рис. 2 представлены графики значений нечёткого вывода с наложением на обучающую и тестовую выборку. При обучении системы использовался гибридный метод и 16 итераций обучения, а также был подобран тип функций принадлежности – сигмоидальный.

Структура разработанной системы схожа со структурой многослойной нейронной сети прямого распространения и состоит из 5 слоев.

В первом слое происходит определение терм – множеств для входных переменных  $u_i^A(x)$ ,  $u_i^B(y)$  и  $u_i^C(z)$ . Здесь  $A, B, C$  – лингвистические переменные,  $x, y, z$  – входная переменная. В целом выход этого слоя опре-

деляет степень, в которой данное входное значение сети  $x$  удовлетворяет  $A_i$ .

Во втором слое реализуется процедура определения уровней активации правил. Выходом узла является степень выполнения правила, которая рассчитывается как произведение входных сигналов (по Ларсену). В частности, для рассматриваемого случая:

$$w_i = u_i^A(x)u_i^B(y)u_i^C(z),$$

где  $w_i$  – выход узлов второго слоя сети (степень выполнения нечеткого правила).

Третий слой – вычисление относительной степени выполнения нечеткого правила (нормализованных значений уровней активации) согласно выражению

$$\bar{w}_i = \frac{w_i}{\sum_{j=1}^m w_j},$$

где  $\bar{w}_i$  – нормализованное значение уровня активации  $i$ -го нечеткого правила.

Четвертый слой производит расчет вклада каждого нечеткого правила в выход сети (нечеткий логический вывод по Сугено):

$$y_i = \bar{w}_i (p_{0,i} + p_{1,i}x_1 + \dots + p_{n,i}x_n) i = 1 \dots m,$$

где  $y_i$  – вклад  $i$ -го нечеткого правила в выход сети;  $p$  – параметры функций принадлежности.

В последнем слое суммируются результаты предыдущего слоя, то есть вклады всех правил:

$$y = \sum_{j=1}^m y_j.$$

Параметры системы и их расшифровка представлены в табл. 2.

Таблица 2

#### Параметры системы нечеткого вывода

| №  | Наименование                                     | Обозначение MATLAB | Значение                    |
|----|--|--------------------|-----------------------------|
| 1  | Имя  | PowerDat           | PowerDat                    |
| 2  | Тип  | sugeno             | Сугено                      |
| 3  | Число входов, выходов                            | -                  | 3,1                         |
| 4  | Число функций принадлежности входных переменных  | -                  | 7, 7, 7                     |
| 5  | Число функций принадлежности выходных переменных | -                  | 343                         |
| 6  | Число правил                                     | -                  | 343                         |
| 7  | Метод логистической конъюнкции                   | prod               | Алгебраическое произведение |
| 8  | Метод логистической дизъюнкции                   | probor             | Алгебраическая сумма        |
| 9  | Метод вывода заключения                          | prod               | Алгебраическое произведение |
| 10 | Метод агрегирования                              | sum                | Граничная сумма             |
| 11 | Метод дефазификации                              | wtaver             | Метод взвешенного среднего  |



При этом среднеквадратичная ошибка отклонения на обучающей выборке составила 2,7 %, на тестовой – 3,2%.

Таким образом, была получена функция countP, возвращающая значение мгновенной мощности потребления робота для вектора входных аргументов (три координаты положения инструмента в пространстве рабочей области робота, скорость подачи инструмента). На рис. 4 показаны поверхности, построенные на основе данных, полученных в результате нейро-нечеткого вывода.

На рис. 4 эмпирическая визуализация полученной эмпирической зависимости наглядно демонстрирует дифференциацию зон энергопотребления робота и может служить частично руководством к выбору оптимального положения изделия в пространстве рабочей области робота. Необходимо отметить, что если некоторые точки поверхности однозначно связаны с электромеханическими параметрами робота, то для некоторых положений такую однозначную взаимосвязь проследить невозможно, что обусловлено нелинейными связями между приводами осей робота.

В результате появляется возможность осуществлять расчет затрат электроэнергии как отдельной траектории перемещения, так и всего комплекса траекторий движения робота, за счет ассоциирования моделей траекторий движения робота управляющей программой с моделью энергопотребления.

Суммарные энергетические затраты в рамках комплекса траекторий движения представляются формулой 3 (при этом отдельной траекторией считается элементарное движение типа LIN или CIRC):

$$W = \sum_{i=1} Wm_i, \quad (3)$$

где  $W$  – значение потребленной энергии на выполнение комплекса траекторий движений управляющей программой;  $Wm_i$  – значение потребленной энергии на отдельную  $i$ -ю траекторию движения управляющей программы;  $n$  – число траекторий движения в рамках всего комплекса траекторий движений управляющей программы.

В свою очередь, значение потребления электрической энергии на отдельную траекторию движения (формула (4)) определяется как сумма произведений мгновенной мощности, возвращаемой функцией countP (координаты точки  $x$ ,  $y$  и  $z$ ) и времени нахождения рабочего инструмента в окрестностях этой точки (окрестность точки задается в зависимости от требуемой точности расчёта) в рамках отдельной траектории движения управляющей программы:

$$Wm_i = \sum_{j=1}^k [\text{countP}(x_j, y_j, z_j)] t_j, \quad (4)$$

где  $Wm$  – значение потребления электрической энергии на отдельное движение управляющей программы;  $\text{countP}(x_j, y_j, z_j)$  – возвращаемое системой нейро-нечеткого вывода значения мощности в точке с координатами  $(x_j, y_j, z_j)$ ;  $t_j$  – время нахождения инструмента в окрестностях точки;  $k$  – число итераций смещения в рамках отдельного движения.

Значение  $k$  определяется исходя из длины  $i$ -го движения и величины  $d$  (шаг дискретизации одной траектории движения на отрезки), устанавливаемой пользователем. При увеличении значения  $d$  увеличивается точность, однако возрастает также и время расчета.

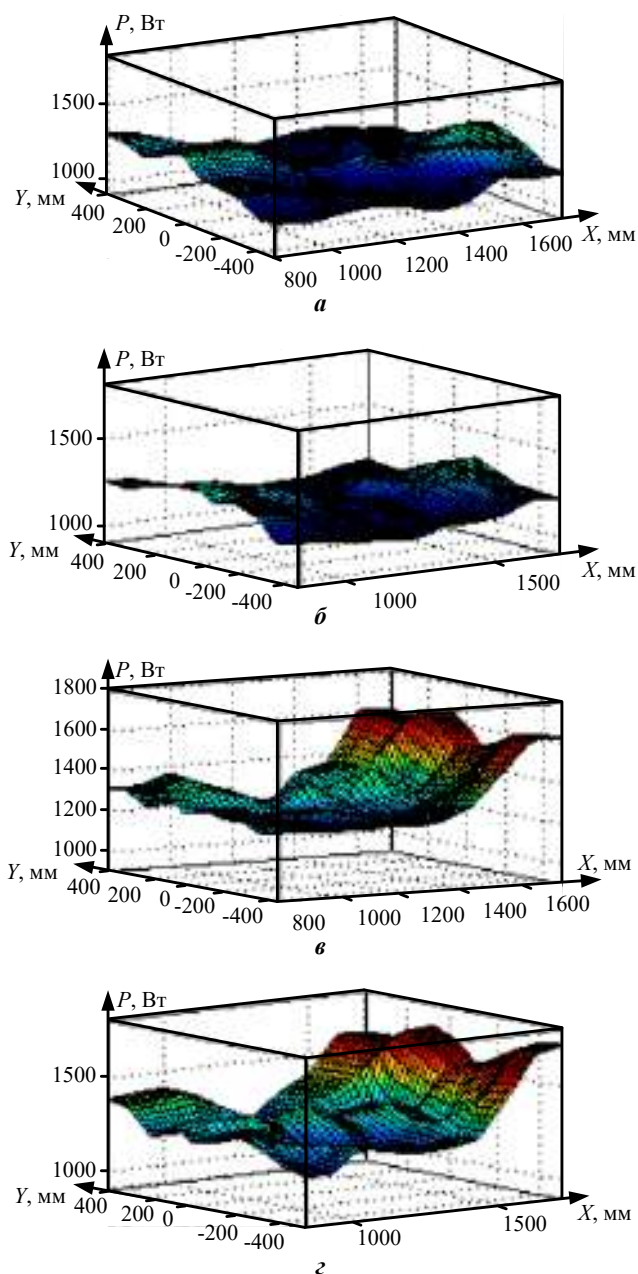


Рис. 4. Поверхности, полученные с помощью функции countP:

$a$  – слой на высоте 1100 мм,  $b$  – слой на высоте 1200 мм,  $v$  – слой на высоте 1500 мм,  $z$  – слой на высоте 1600 мм

Время нахождения рабочего инструмента в окрестностях промежуточных точек (формула (5)) определяется выражением

$$t_j = \frac{l_i}{vd}, \quad (5)$$

где  $l_i$  – длина  $i$ -го движения;  $v$  – скорость перемещения манипулятора;  $d$  – шаг дискретизации одной траектории движения на отрезки.

Длина движения  $l_i$  определяется исходя из данных о начальных и конечных координатах траектории движения:

$$l_i = \sqrt{(x_i^e - x_i^b)^2 + (y_i^e - y_i^b)^2 + (z_i^e - z_i^b)^2}, \quad (6)$$

где  $(x_i^e, y_i^e, z_i^e)$  – координаты конечной точки  $i$ -го движения;  
 $(x_i^b, y_i^b, z_i^b)$  – координаты начальной точки  $i$ -го движения.

Координаты точек  $P(x, y, z)$  для отдельного движения управляющей программы (7) определяются выражениями

$$x = x_b + \frac{2(x_e - x_b)}{d} + \frac{x_e - x_b}{d}k, \quad (7)$$

где  $k$  – номер итерации смещения для отдельного движения управляющей программы ( $k = 0 \dots d$ ).

ДЕМОНСТРАЦИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ  
 МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ РОБОТА  
 ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ПОЛОЖЕНИЯ ДЕТАЛИ  
 В РАБОЧЕЙ ОБЛАСТИ РОБОТА

Ниже представлены результаты моделирования по предложенным результатам исследования (табл. 2) демонстрирующие эффективность процедуры. Необходимо отметить, что предложенное во второй части подпространство траекторий движений не претендует на оптимальность, но тем не менее демонстрирует значительный положительный эффект.

Данные, приведенные в табл. 3, получены на основании реализации технологического процесса изготовления фланца (рис. 5), для обработки которого была разработана управляющая программа.

Таблица 3

Параметры моделирования и результаты

| Параметр                             | Значение параметра (типовое положение изделия) | Значение параметра (положение с учетом коррекций) |
|--------------------------------------|--|---|
| Число движений программы             | 8400   | 8400  |
| Координаты базовой системы координат | $(x - 900, y - 0, z - 900)$                    | $(x - 1100, y - 0, z - 1300)$                     |
| Время обработки                      | 51 мин.  | 51 мин.   |
| Потребление фактическое              | 730 Вт·ч                                       | 664 Вт·ч  |
| Потребление по модели                | 762 Вт·ч                                       | 679 Вт·ч  |

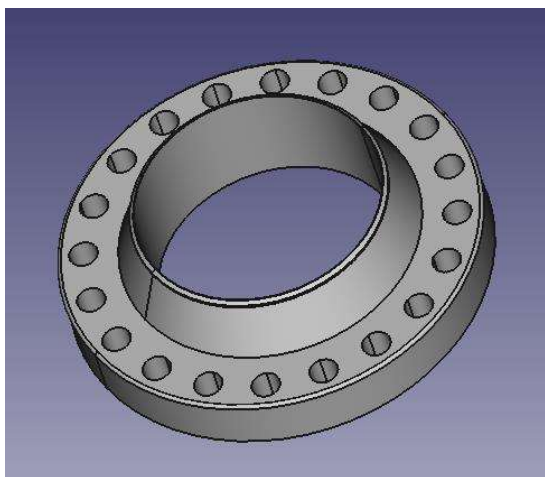


Рис. 5. Фланец приварной

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании результатов приведенных экспериментов показано, что рабочее пространство промышленного робота характеризуется различными дискретными значениями энергопотребления. Для математического описания энергопотребления робота в технологическом процессе был разработан подход (основанный на инструментариим нейро-нечетких систем) идентификации нелинейной зависимости энергопотребления от траекторий движения, открывающий перспективы дальнейшей разработки методов, позволяющих прогнозировать необходимые коррекции (смену положения заготовки) управляющей программы промышленного робота в рамках автоматизированного технологического процесса.

Экспериментально доказано, что изменение базовых координат размещения изделия на основе разработанного подхода обеспечивает снижение энергопотребления на 15%. При этом предлагаемый подход не связан с изменениями технологических алгоритмов производства изделий, а значит, негативно не сказывается на качестве выходной продукции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chemnitz M., Schreck G., Kruger J. Analyzing energy consumption of industrial robots. Emerging Technologies and Factory Automation, 2011, pp. 8-13.
2. Siar M.V.S., Fakharian A. Energy efficiency in the robot arm using genetic algorithm. 8th Conference of AI & Robotics and 10th RoboCup Iranopen International Symposium (IRANOPEN), 2018, pp. 14-20.
3. Ефимов А.Ю., Горькавый М.А. К вопросу создания интеллектуальной системы прогнозирования и оптимизации энергетических затрат роботизированного участка // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению. 2017. С. 88-90.
4. Ефимов А.Ю., Горькавый М.А. Концептуальный анализ направлений оптимизации роботизированных технологических процессов // ГАГАРИНСКИЕ ЧТЕНИЯ - 2018. 2018. С. 311-312.
5. Gorkavyy M.A., Efimov A.Y., Soloviev V.A., Solovev D.B. Algorithmization and Principles of Construction of Information Support of the Automated Module for Energy Outlays Optimization of Technological Processes at Robotized Productions. 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, 2018, pp. 1-4.
6. Gorkavyy M.A., Efimov A.Y., Gudim A.S., Solovev D.B. Intelligent System for Prognostication and Optimization of Power Expenses of Technological Processes at Robotized Productions. 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, 2018, pp. 1-4.
7. Mahdavian M., Shariat-Panahi M., Yousefi-Koma A., Ghasemi-Toudeshki A. Optimal trajectory generation for energy consumption minimization and moving obstacle avoidance of a 4DOF robot arm. 3rd RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (ICROM), 2015, pp. 353-358.
8. Feng L., Ulutan D., Mears L. Energy consumption modeling and analyses in automotive manufacturing final assembly process. IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech), 2015, pp. 224-228.
9. Gao M., Ding P., Yang Y. Time-Optimal Trajectory Planning of Industrial Robots Based on Particle Swarm Optimization. Fifth International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC), 2015, pp. 1934-1939.
10. Zheng X., Zheng Y., Shuai Y., Yang Y., Tian Y. IEEE 3rd Information Technology, Networking, Electronic and Auto-

- mation Control Conference (ITNEC), 2019, pp. 1749-1754.
11. Зайченко И.В. Разработка и исследование нечетких систем управления сложными объектами: дис... канд. техн. наук / Зайченко Илья Владимирович. Комсомольск-на-Амуре, 2011.
  12. Трусев Р.Е., Горькавый М.А., Соловьев В.А. Разработка принципа нечеткого иерархического вывода автоматизированных модулей управления производственными процессами электросетевых компаний // Информатика и системы управления. 2017. №3(53). С.96-108.
  13. Горькавый М.А. Модели, методы и средства управления и интегрированной информационной поддержки производственных процессов предприятия металлургической

- отрасли: дис... канд. техн. наук / Горькавый Михаил Александрович. Комсомольск-на-Амуре, 2011.
14. Egorova V.P., Gorkavyi M.A., Efimov A. Y., Solovov D.B. Synthesis of an Adaptive System for Diagnosing the Quality of Automated Welding Products. International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), 2019, pp.1-4.
  15. Efimov A.Y., Gorkavyi M.A., Gorkavyi A.I., Solovov D.B. Improving the Efficiency of Automated Precision Robotics-Enabled Positioning and Welding. International Science and Technology Conference (EastConf), 2019

Поступила в редакцию 13 апреля 2020 г.

## INFORMATION IN ENGLISH

### ENERGY-EFFICIENT ALGORITHMS FOR CONTROLLING THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF MANUFACTURING PRODUCTS BASED ON AN INDUSTRIAL ROBOTIC SYSTEM

Alexey Yu. Efimov

Assistant Professor, Department of Management of innovative processes and projects, Komsomolsk-on-Amur State University, Komsomolsk-on-Amur, Russia. E-mail: alexey.efimov.1996@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4272-4990>

Michael A. Gorkavyi

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Management of innovative processes and projects, Komsomolsk-on-Amur State University, Komsomolsk-on-Amur, Russia. E-mail: uipp@knastu.ru.

Vyacheslav A. Soloviev

D.Sc. (Engineering), Professor, Department of Electrical drive and automation of industrial facility, Komsomolsk-on-Amur State University, Komsomolsk-on-Amur, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7930-0601>

The paper presents an approach that provides the possibility of identifying nonlinear dependencies of energy consumption of an industrial robot, which is part of an automated technological process, through the use of neuro-fuzzy models. The research group experimentally confirmed the presence of significant differences in the values of the average power consumption of the robot depending on the state of its axes, which, in turn, determines the potential for energy saving when implementing the possibility of choosing the least energy-consuming zones of the robot working area when forming the control program. A complex measurement procedure was performed and a data array of instantaneous power values and corresponding coordinate values was formed. On the basis of a training sample, using the tools of neuro-fuzzy systems, a model of energy consumption of an industrial robot was formed, which allows predicting energy costs when executing a specific control program of the technological process. The parameters of the resulting neuro-fuzzy system and the algorithms implemented in its subsystems are described in detail. Based on the results of representative testing of the model in the entire working area of the industrial robot and correlation with data obtained from measuring devices, the experiment demonstrated the possibility of a significant reduction in energy costs in the range of 7 – 15 %. The ways of integrating the proposed management tools into the production processes of an industrial enterprise are outlined and the tasks of prospective research are defined.

**Keywords:** automation, robotics, energy saving, robotic processes, optimization, management.

#### REFERENCES

1. Chemnitz M., Schreck G., Kruger J. Analyzing energy consumption of industrial robots. Emerging Technologies and Factory Automation, 2011, pp. 8-13.
2. Siar M.V.S., Fakharian A. Energy efficiency in the robot arm

- using genetic algorithm. 8th Conference of AI & Robotics and 10th RoboCup Iranopen International Symposium (IRANOPEN), 2018, pp. 14-20.
3. Efimov A. Y., Gorkavyi M.A. On the issue of creating an intelligent forecasting system and optimize the energy costs of the robotic site. *Proizvodstvennye tehnologii budushhego: ot sozdaniya k vnedreniyu* [Production technologies of the future: from creation to implementation], 2017, pp. 14-20. (In Russian)
  4. Efimov A. Y., Gorkavyi M.A. Conceptual analysis of optimization directions of robotic technological processes. *Gagarinskije Chteniya – 2018* [Gagarin's readings – 2018], 2018, pp. 311-312. (In Russian)
  5. Gorkavyi M.A., Efimov A.Y., Soloviev V.A., Solovov D.B. Algorithmization and Principles of Construction of Information Support of the Automated Module for Energy Outlays Optimization of Technological Processes at Robotized Productions. 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, 2018, pp. 1-4.
  6. Gorkavyi M.A., Efimov A.Y., Gudim A.S., Solovov D.B. Intelligent System for Prognostication and Optimization of Power Expenses of Technological Processes at Robotized Productions. 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, 2018, pp. 1-4.
  7. Mahdavian M., Shariat-Panahi M., Yousefi-Koma A., Ghasemi-Toudeshki A. Optimal trajectory generation for energy consumption minimization and moving obstacle avoidance of a 4DOF robot arm. 3rd RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (ICROM), 2015, pp. 353-358.
  8. Feng L., Ullutan D., Mears L. Energy consumption modeling and analyses in automotive manufacturing final assembly process. IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech), 2015, pp. 224-228.
  9. Gao M., Ding P., Yang Y. Time-Optimal Trajectory Planning of Industrial Robots Based on Particle Swarm Optimization. Fifth International Conference on Instrumentation

- and Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC), 2015, pp. 1934-1939.
  10. Zheng X., Zheng Y., Shuai Y., Yang Y., Tian Y. IEEE 3rd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC), 2019, pp. 1749-1754.
  11. Zaychenko I.V. *Razrabotka i issledovanie nechetkih sistem upravleniya slozhnyimi obektami. Kand. Diss.* [Development and research of fuzzy control systems for complex mobile objects. Ph.D. Diss.]. Komsomolsk – on – Amur, 2011.
  12. Trusov R. E., Gorkavyy M. A., Soloviev V. A. Development of the principle of fuzzy hierarchical output of automated control modules for production processes of electric grid companies. *Informatika i sistemy upravleniya* [Informatics and control systems], 2017, No. 3 (53). P. 96-108. (In Russian)
  13. Gorkavyy M. A., *Modeli, metody i sredstva upravleniya i integrirovannoy informatsionnoy podderzhki proizvodstvennykh processov predpriyatija metallurgicheskoy otrasli. Kand. Diss.* [Models, methods and means of management and integrated information support of production processes in the metallurgical industry. Ph.D. Diss.]. Komsomolsk-on-Amur, 2010.
  14. Egorova V.P., Gorkavyy M.A., Efimov A. Y., Solovev D.B. Synthesis of an Adaptive System for Diagnosing the Quality of Automated Welding Products. International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), 2019, pp.1-4.
  15. Efimov A.Y., Gorkavyy M.A., Gorkavyy A.I., Solovev D.B. Improving the Efficiency of Automated Precision Robotics-Enabled Positioning and Welding. International Science and Technology Conference (EastConf), 2019.
- Ефимов А.Ю., Горькавый М.А., Соловьев В.А. Идентификация нелинейных зависимостей энергопотребления промышленного робота в задачах повышения эффективности управления автоматизированным технологическим процессом // *Электротехнические системы и комплексы*. 2020. № 2(47). С. 64-71. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2\(47\)-64-71](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2(47)-64-71)
- Efimov A.Yu., Gorkavyy M.A., Soloviev V.A. Energy-Efficient Algorithms for Controlling the Technological Process of Manufacturing Products Based on an Industrial Robotic System. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 2(47), pp. 64-71. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2\(47\)-64-71](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2(47)-64-71)