

**Ворощенко В. Д., Егорова В. П., Горькавый М. А.**  
**V. D. Voroshenko, V. P. Egorova, M. A. Gorkavii**

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ МОДУЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ  
ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА НА БАЗЕ АГЕНТНОЙ  
ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ**

**INTELLIGENT MODULE FOR OPTIMIZATION AND MANAGEMENT OF PRODUCTION  
PROCESS EFFICIENCY BASED ON AGENT SIMULATION MODEL**

**Ворощенко Василий Данилович** – студент кафедры «Управление инновационными процессами и проектами» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: v.voroshenko@yandex.ru.

**Vasily D. Voroshenko** – Student, Management of Innovative Processes and Projects Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: v.voroshenko@yandex.ru.

**Егорова Валерия Павловна** – старший преподаватель кафедры «Управление инновационными процессами и проектами» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: Ler4ik\_007\_94@mail.ru.

**Valeria P. Egorova** – Senior Teacher, Management of Innovative Processes and Projects Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: Ler4ik\_007\_94@mail.ru.

**Горькавый Михаил Александрович** – кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Управление инновационными процессами и проектами» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: mixkomsa@gmail.com.

**Mikhail A. Gorkavii** – PhD in Engineering, Head of Management of Innovative Processes and Projects Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: mixkomsa@gmail.com.

**Аннотация.** В работе представлен метод оптимизации роботизированного сварочного комплекса путём разработки интеллектуального модуля, предназначенного для определения координат точки сварки с минимальными суммарными затратами энергопотребления и времени на выполнение технологического процесса, на базе имитационной модели. Продемонстрированы необходимость и специфика применения имитационной модели для визуализации производственного процесса и определения оптимальных параметров его работы. Применение разработанного метода позволит продемонстрировать существенное снижение времени выполнения операций по перемещениям, обеспечивающих сварку роботизированным комплексом.

**Summary.** The paper presents a method for optimizing a robotic welding complex by developing an intelligent module designed to track changes in energy consumption indicators and time spent on the execution of a technological process, based on a simulation model. The necessity and specifics of using neural network models to identify nonlinear dependences of resource consumption by a robot and their joint use to calculate the optimal parameters of the system are demonstrated. The application of the developed approach will make it possible to demonstrate a significant reduction in the time of performing operations on movements that ensure welding by a robotic complex.

**Ключевые слова:** интеллектуальный модуль, имитационная модель, система поддержки принятия решений, электроэнергия, роботизированный технологический процесс, эффективность, сварочный комплекс.

**Key words:** intelligent module, simulation model, decision support system, electric power, robotic process, efficiency, welding complex.

*Данное исследование выполнено в рамках НИОКТР «Разработка методов повышения энергетической эффективности роботизированных технологических процессов», финансируемой за счёт средств ФГБОУ ВО «КнАГУ» № ВН002/2020. Исследование проводилось с использованием оборудования Научно-образовательного центра «Промышленная робототехника и передовые промышленные технологии».*

**Введение.** Роботизация производства является одним из современных и востребованных методов повышения эффективности промышленного предприятия [1; 5]. Но проектирование и наладка роботизированного производственного процесса осуществляются на основе эмпирических и не подтверждённых анализом данных конкретного рассматриваемого процесса.

Основной функцией промышленных роботов является перемещение эффектора из одной точки в другую по заданной заранее траектории. Любая траектория может быть охарактеризована расстоянием, которое объект проходит, двигаясь по ней. Отсюда вытекает главная задача при проектировании роботизированного процесса: необходимо найти траекторию с минимальными затратами на перемещения и при этом с минимальным суммарным энергопотреблением [9]. Для комплекса из нескольких роботов с разным функционалом это достаточно сложная задача, чтобы решить её эмпирически. Поэтому предлагается разработать имитационную модель комплекса, с её помощью определить все возможные параметры его работы и найти среди них оптимальные. Исходя из этого была сформулирована цель: разработать систему поддержки принятия решений (СППР) по управлению производственным процессом, которая состоит из интеллектуального модуля на базе агентной имитационной модели.

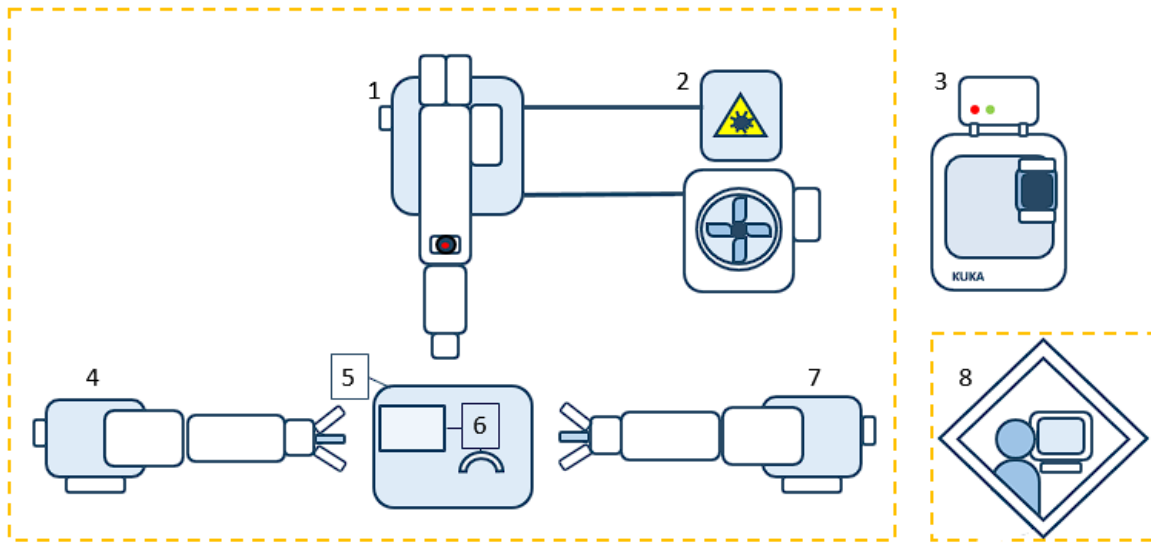
**Методология.** Задачи оптимизации роботизированных систем могут ставиться как локально, применительно к одному роботу, представляющему роботизированную ячейку, так и глобально, применительно ко всей ячейке в целом. Оптимизация подразумевает под собой минимизацию каких-либо параметров системы или их максимизацию, например, затраты ресурсов или точность [2]. Исходя из этого определяется, требуется ли подвергать изменениям технологию производства (техпроцесс сварки или лазерной резки). В представленной работе изменения в роботизированном процессе предусмотрены только для перемещений роботов, обеспечивающих выполнение сварки. Техпроцесс сварки изменениям не подвергается.

Имитационное моделирование предполагает исследование реальной системы с помощью проведения экспериментов над его точной цифровой моделью [4; 11; 12]. Полученные результаты анализируются и используются для формирования корректирующих воздействий на исследуемую систему. Также имитационная модель может выступать в роли «цифрового двойника» объекта управления и предоставлять возможность оперативного отслеживания изменения соответствующих показателей, отображение которых система не предусматривает, или управлять ею посредством управления моделью [1; 5; 10; 14]. Основной задачей модели является имитирование процессов роботизированного комплекса для получения данных об изменении потребления ресурсов роботизированного процесса в зависимости от изменения контрольных точек. В таком случае модель необходима для демонстрации работоспособности предлагаемого интеллектуального модуля, который на основании полученных данных определит контрольную точку с наименьшим потреблением ресурса. Имитация зависимости потребления роботом ресурсов от траектории будет реализована на базе нейросетевой модели. Этот инструмент позволяет идентифицировать зависимость энергопотребления и времени на выполнение траекторного перемещения от точек, между которыми строится траектория. Подобный подход уже был использован для идентификации динамики манипулятора [6; 7].

Проектирование логики интеллектуального модуля и моделируемых процессов описывается с помощью нотации Basic Flowchart. Блок-схема может представлять разноуровневые процессы, также алгоритмы могут выступать концептуальной моделью для разработки программного обеспечения.

**Результаты и обсуждения.** Роботизированный технологический комплекс (РТК) – гибкая производственная система, в которой промышленные роботы реализуют всю технологию производства, за исключением управления и контроля [13]. Состав объектов, участвующих в роботизированном сварочном процессе, показан на рис. 1.

Технологический процесс роботизированной сварки состоит из последовательности действий (см. рис. 2).



- 1 – робот-сварщик KUKA 5 Arc; 2 – лазер ЛС-2; 3 – контроллер роботов;  
 4 – робот-позиционер KUKA KR 10; 5 – сварочный стол; 6 – заготовки;  
 7 – робот-позиционер KUKA KR 60; 8 – инженер-технолог

Рис. 1. Схема расположения РТК

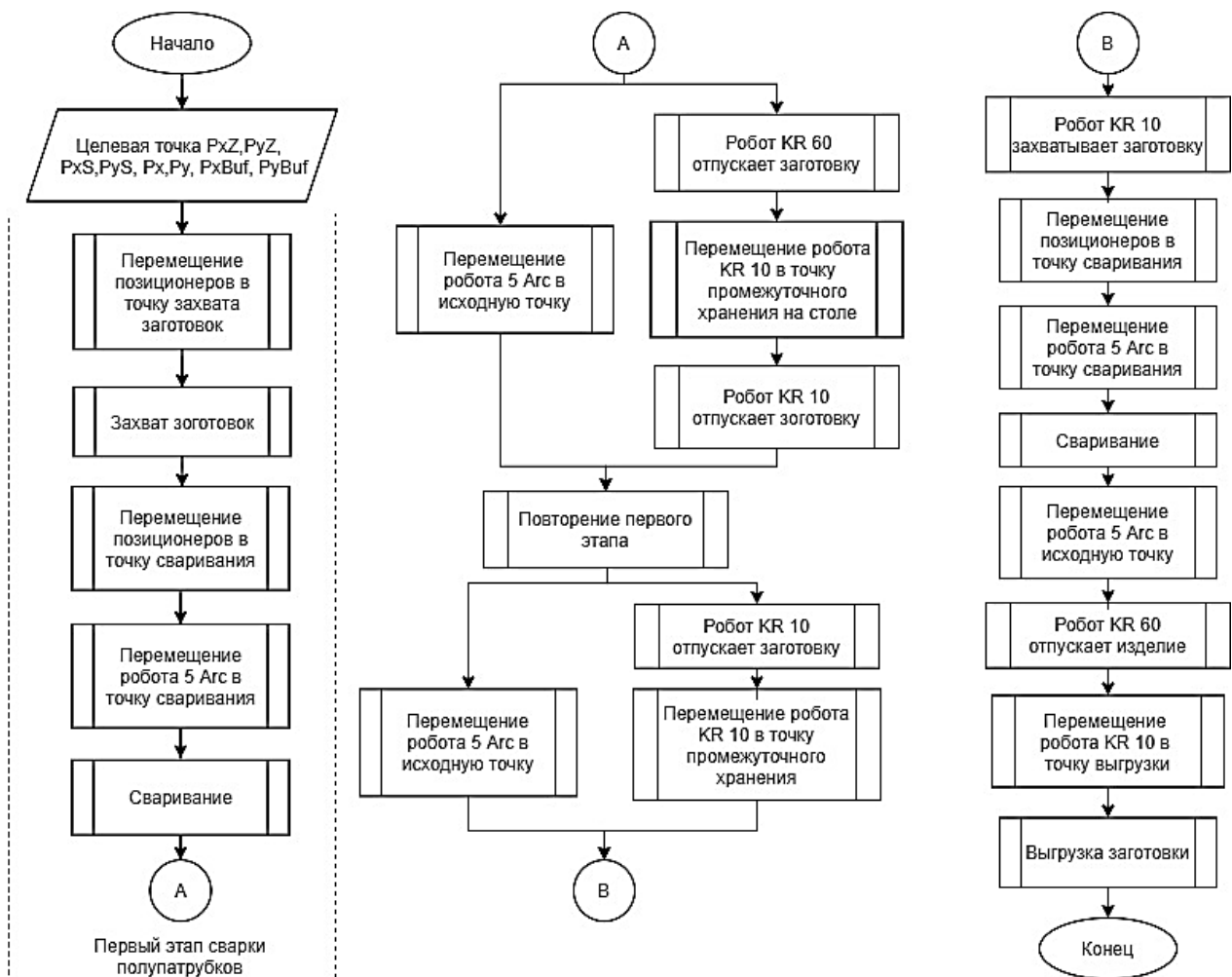


Рис. 2. Алгоритм работы РТК

Как уже было упомянуто, необходимые для формирования управляющих воздействий параметры – электроэнергия и время. В табл. 1 представлено описание этих данных.

Таблица 1

Данные, отражающие состояние модели

| Параметр       | Составляющие   |
|----------------|--|
| Электроэнергия | 1. Электроэнергия, которую потребляет роботизированная ячейка на основе манипулятора KUKA KR10, KR60, 5 Arc.<br>2. Электроэнергия, которую потребляет лазерная установка в течение всего технологического цикла. |
| Время          | 1. Время на выполнение операции сварки.<br>2. Время на выполнение перемещений роботом KR 10.<br>3. Время на выполнение перемещений роботом KR 60.<br>4. Время на выполнение перемещений роботом 5 Arc.           |

Следует отметить, что каждому перемещению роботов соответствует отдельная форма траектории, для которой должно быть рассчитано время выполнения. Каждая составляющая времени состоит из суммы этих значений.

Управление этими параметрами можно осуществить опираясь на следующие свойства:

- величина двух параметров определяется расстоянием между контрольными точками в пространстве (точками захвата, выгрузки и точкой сварки);

- количество энергии, затрачиваемое роботом-сварщиком на выполнение сварки, зависит от расположения свариваемых объектов относительно робота, эта зависимость обусловлена спецификой устройства манипулятора [8].

В результате задача оптимизации роботизированным сварочным комплексом состоит в изменении координат контрольных точек таким образом, чтобы весь комплекс затрачивал минимальное количество либо энергии, либо времени [16; 17].

В рассматриваемой системе моделируемыми объектами (агентами) выступают: роботизированные ячейки, заготовки как объекты, с которыми взаимодействуют роботы, и система управления, выполняющая функции по запуску производственного процесса с заданными параметрами, координации роботов и мониторингу показателей.

Поскольку моделирование выполняется с целью визуализации и расчёта потребления ресурсов роботами в зависимости от положения координат точек, то и состояние модели должно быть отражено визуально и параметрически. Таким образом, поведение каждого агента формирует всё состояние модели [8].

Агенты роботов должны иметь функцию определения потребления ресурсов на осуществляемое перемещение. Так как в реальном объекте затрачивание ресурсов напрямую зависит от перемещений, а определить эту зависимость математически становится сложным, то для этого будут использованы нейросетевые модели потребления, созданные на основе собранных реальных данных о затратах энергии и времени. Цель этого агента состоит в выполнении задаваемых траекторий оптимальным для себя образом и перемещении объектов (заготовок).

Для создания нейронной сети были проведены измерения затрат времени и энергии на выделенные траекторные формы входящих в алгоритм работы РТК. Траекторная форма состоит из множества изначальных и целевых точек. Из полученных измерений была составлена и использована обучающая выборка. Обученные на их основе нейросети используются в работе. Такая модель выявляет реальные, но скрытые и нелинейные зависимости [9].

Таким образом, СППР позволяет определить параметры работы комплекса, при которых он тратит минимальное количество времени либо электроэнергии, на основании данных, соответствующих действительности, определяющей суммарное время выполнения последовательности

при всех возможных координатах точки сварки и алгоритма по поиску точки сварки с минимальным временем выполнения промежуточных действий (см. рис. 3) [15; 18].

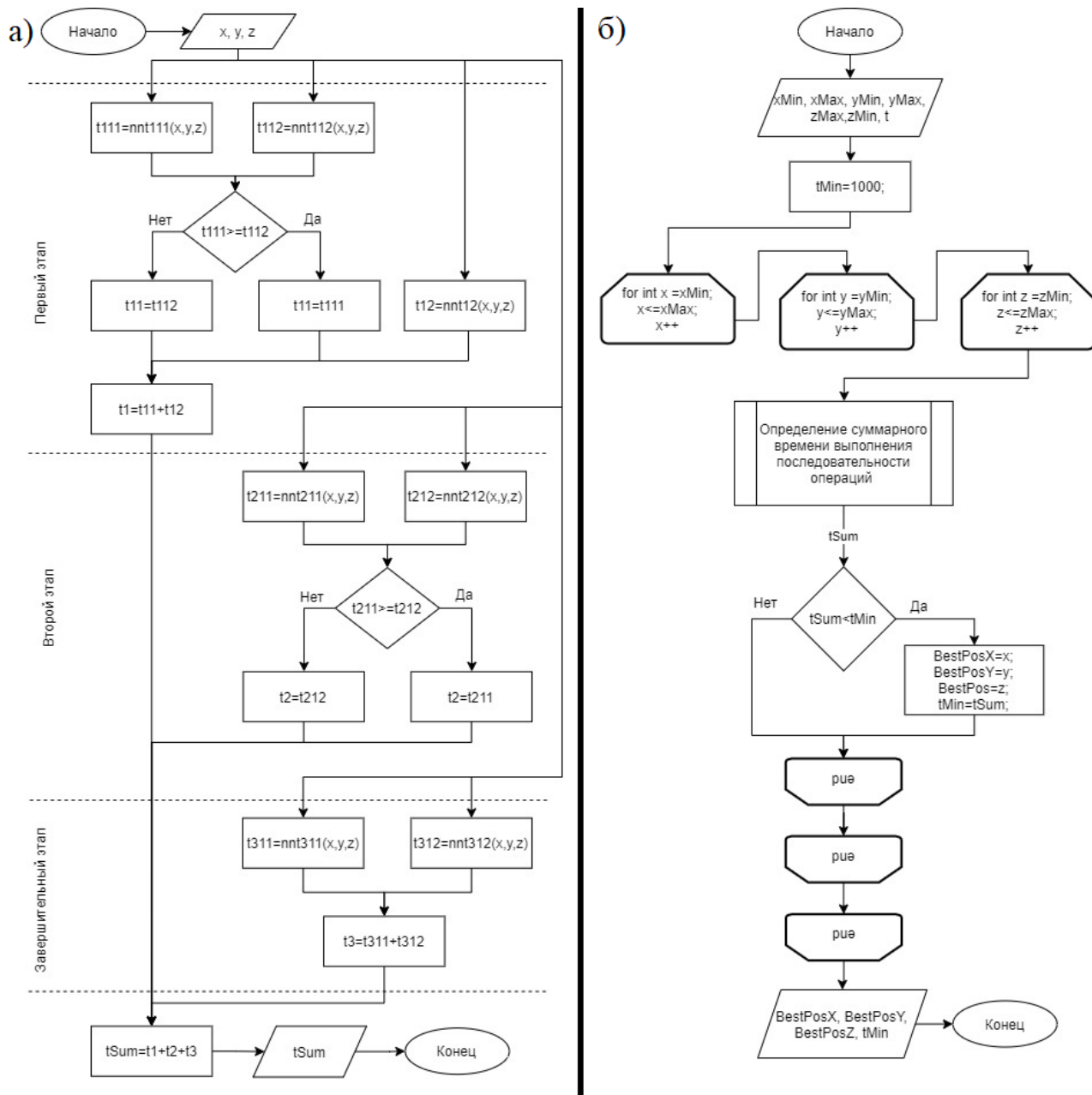


Рис. 3. Алгоритмы интеллектуального модуля по минимизации затрат времени:  
 а – алгоритм определения суммарного времени выполнения технологического цикла;  
 б – алгоритм поиска точки с минимальным суммарным временем

Первый алгоритм на первом этапе ограничивается моментами захвата заготовок и выгрузки первого патрубка в точку промежуточного хранения. Для начала определяется время перемещения  $t11$  заготовок в точку сварки; поскольку операция осуществляется одновременно, но двумя позиционером, то выбирается большее время перемещения. Затем определяется время на перемещение первого патрубка  $t12$  в точку промежуточного хранения, и полученные значения суммируются в переменную  $t1$  (время выполнения первого этапа).

Для второго этапа определяется только время перемещения от точки захвата к точке сварки. Для третьего – сумма времени на перемещение к точке промежуточного хранения и обратно и времени на перемещение к точке выгрузки.

Время рассчитывается с помощью нейросетевой модели для каждого перемещения. После полученные три значения суммируются и выводятся как результат алгоритма.

Второй алгоритм на вход принимает координаты области, в которой может выполняться сварка. Задаётся значение переменной  $tMin$ , и запускается цикл по перебору всех точек в заданной области. Каждую точку цикл подаёт на вход алгоритму определения суммарного времени выполнения последовательности промежуточных операций. Полученное от него значение сравнивается с  $tMin$ , и, если  $tSum$  меньше, то  $tMin$  приравнивается  $tSum$  и поданные на вход координаты записываются. После выполнения цикла записанные координаты подаются на выход. Таким образом и осуществляется поиск координат точки сварки с минимальным суммарным временем выполнения промежуточных действий.

По такому же принципу устроены алгоритмы, связанные с энергопотреблением (см. рис. 4) [19; 20].

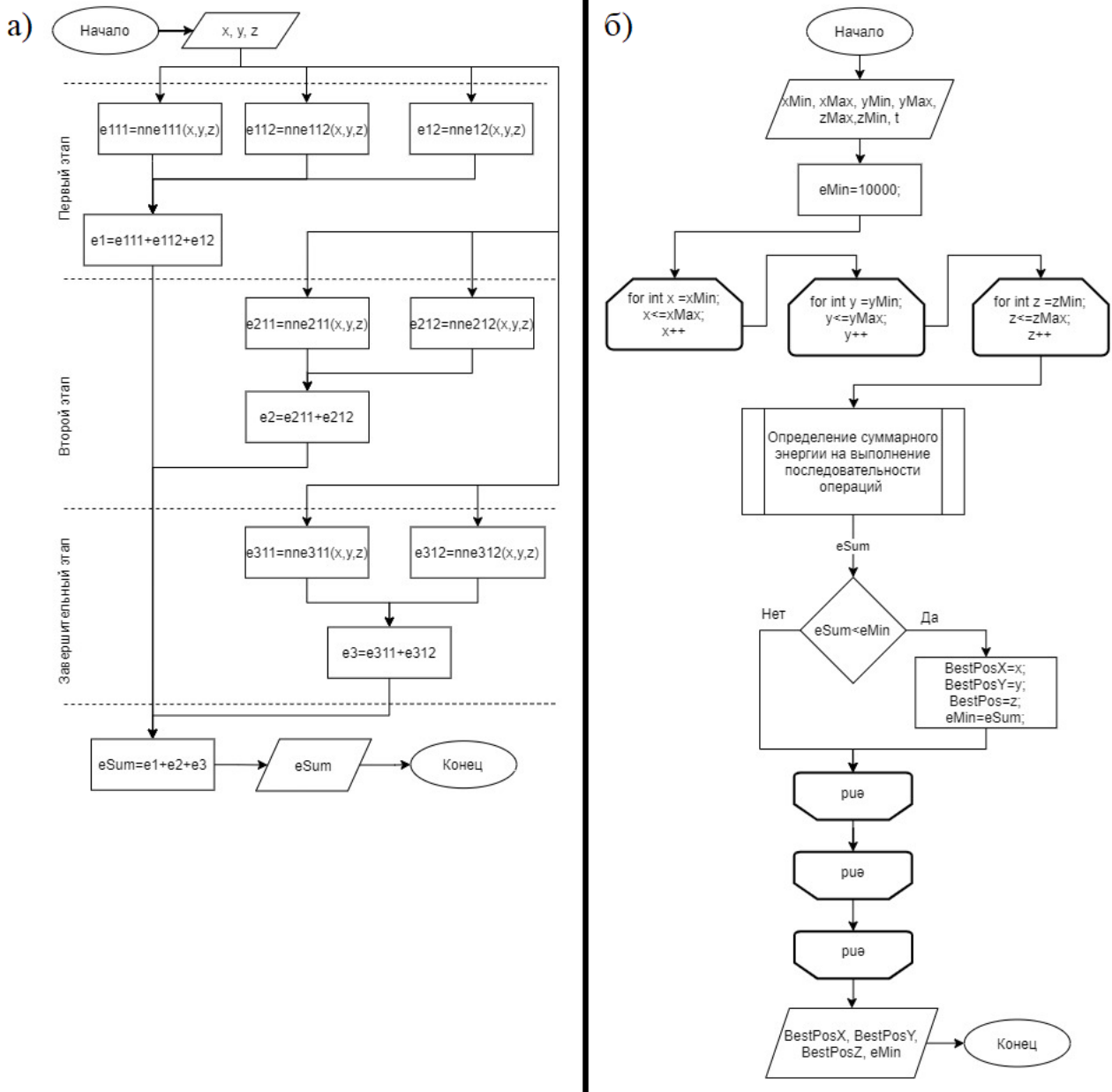


Рис. 4. Алгоритмы интеллектуального модуля по минимизации энергопотребления:  
 а – алгоритм определения суммарного энергопотребления;  
 б – алгоритм поиска точки с минимальным суммарным энергопотреблением

На рис. 5 представлен кадр симуляции модели процесса сварки. Следует отметить, что была реализована часть интеллектуального модуля, отвечающего за минимизацию временных затрат, для демонстрации работоспособности метода. На рис. 5 представлены только кадры выполнения сварки, поскольку результаты интеллектуального модуля проявляются именно на этом этапе. Выделенная зона прямоугольной формы на столе – это исследуемая область допустимых точек сварки. Движения и возможность выполнить сварку в другой области она не ограничивает, но нейросетевые модели затрат времени на выполнение обеспечивающих сварку траекторий способны сформировать результат только для этой зоны выполнения сварки. Точка на стыке двух заготовок – это точка сварки. В первом случае она задана заранее перед запуском модели, во втором рассчитана с помощью интеллектуального модуля. Для всех роботов точка сварки интерпретируется по-разному: для 5 Arc это точка центра дуги, по которой он выполняет шов, для позиционеров – центр сечения патрубка с противоположной стороны от места его захвата (для KR 60 эта точка расположена слева от места захвата). В управляющих программах роботов точка, в которой выполняется сварка, имеет разные для каждого координаты. В модели эти точки обобщены в одну для упрощения работы алгоритма и интерпретации его работы. Чтобы воспользоваться рассчитанной интеллектуальным модулем точкой необходимо её перевести в корректное для робота значение.

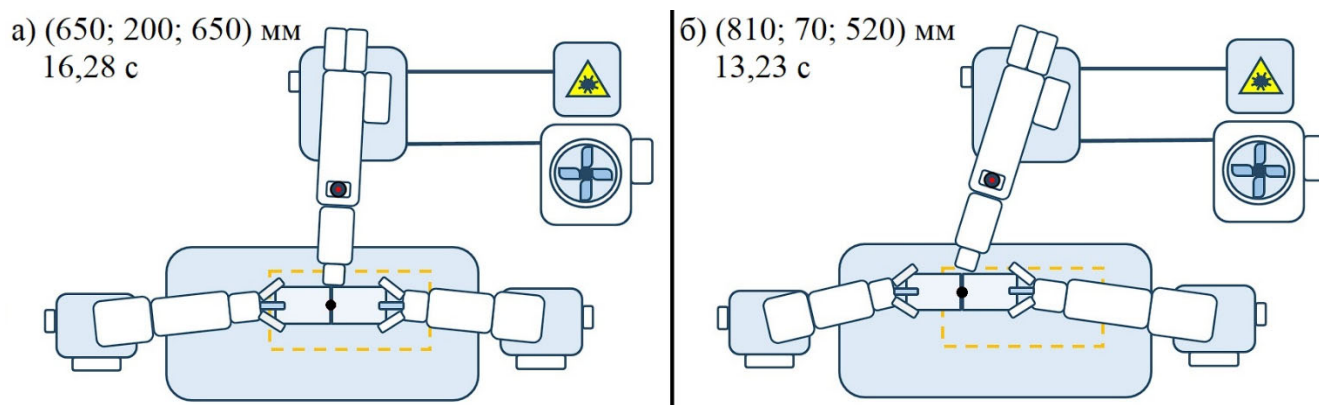


Рис. 5. Кадры симуляции модели:

- а – положение роботов при выполнении сварки до использования интеллектуального модуля;  
 б – положение роботов при выполнении сварки после использования интеллектуального модуля

В имитационной модели реализованы функции управления моделируемым временем, параметры состояния объектов изменяются с течением времени при наступлении каких-то событий, вызванных работой алгоритма. Принятые размеры в уменьшенном масштабе соответствуют реальным, что говорит об адекватности визуализации.

Следует отметить, что определение эффективности предложенных решений на базе имитационной модели широко применяется в задачах оптимизации роботизированных систем, в частности, основывается на математическом моделировании [2; 3].

Определение суммарного времени выполнения промежуточных действий осуществляется по алгоритму, описанному выше. Для первого случая используется точка, установленная при проектировании роботизированного процесса, для второго – точка, рассчитанная интеллектуальным модулем. Это изменение можно отследить в левых верхних углах кадров симуляции. Также интерфейс выводит значение времени на выполнение моделируемой последовательности операций. Как можно заметить, произошло снижение на 18 %.

Таким образом, получилось найти точку сварки, которая обеспечивает минимальное выполнение исследуемых промежуточных действий среди всех возможных случаев.

**Заключение.** В результате работы было сформировано представление о целесообразности применения имитационного агентного моделирования при формировании управленческих реше-

ний над производственным процессом и использования интеллектуального модуля как системы формирования рекомендаций по управлению процессом.

Также были представлены описание рассматриваемого технологического процесса, концептуальное описание имитационной модели, разработанной на его основе, демонстрационного варианта реализованной в программе модели, визуально и параметрически отображающей выполнение части моделируемого производственного процесса.

Были представлены возможности для повышения эффективности роботизированного сварочного процесса комплекса, определены параметры, на основе которых необходимо принять дополнительные управляющие воздействия, что в дальнейшем было отражено в формировании логики работы интеллектуального модуля. На основании этого была проведена частичная реализация модуля для отображения его работоспособности и зависимостей, на базе которых он формирует решение. В результате его работы получилось снизить время на выполнение обеспечивающих сварку перемещений на 18,5 %.

Представленный метод позволяет в краткие сроки провести оптимизацию отдельно взятого роботизированного процесса. Его использование нецелесообразно для постоянно меняющихся технологических процессов на базе одного и того же комплекса, но может послужить основой для этого.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Malik, A. A. Framework to implement collaborative robots in manual assembly: a lean automation approach / A. A. Malik, A. Bilberg // Proceedings of the 28th DAAAM International Symposium, Vienna, Austria. – 2017. – P. 1151-1160. DOI: 10.2507/28th.daaam.proceedings.160/.
2. Лахменев, А. С. Оптимизация электромеханических систем по критериям точности позиционирования и энергетическим затратам / А. С. Лахменев, А. В. Саушев // Труды Международного симпозиума «Надёжность и качество». – 2020. – № 1. – С. 269-271.
3. Оптимизация траекторий промышленных роботов-манипуляторов для лазерной резки / М. М. Кожевников, О. А. Чумаков, В. М. Шеменков, И. Э. Илюшин, А. А. Юркина // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2020. – № 2 (67). – С. 21-30.
4. Sun, X. A digital twin-driven human-robot collaborative assembly-commissioning method for complex products / X. Sun, R. Zhang, S. Liu // Int J Adv Manuf Technol 118. – 2020. – P. 3389-3402. DOI: 10.1007/s00170-021-08211-y.
5. Balogun A. A. A., Improving the energy efficiency of production processes at industrial enterprises of the Russian Federation / A. A. A. Balogun, P. Hefei, E. S. Zakharova // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. – 2022.
6. Маршаков, Д. В. Нейросетевая идентификация динамики манипулятора / Д. В. Маршаков, О. Л. Цветкова, А. Р. Айдинян // Инженерный вестник Дона. – 2011. – № 3. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/neyrosetevaya-identifikatsiya-dinamiki-manipulyatora> (дата обращения: 26.06.2022). – Текст: электронный.
7. Объектно-ориентированный анализ и проектирование с примерами приложений / Г. Буч, Р. Максимчук, М. Энгл, Б. Янг, Д. Коналлен, К. Хьюстон. – М.: ООО «И. Д. Вильямс», 2008. – 720 с.
8. Кузин, А. Ю. Мультиагентная система управления распределённой энергосистемой / А. Ю. Кузин, Д. В. Лукичев, Г. Л. Демидова // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. – 2020. – Т. 12. – № 5. – С. 945-954.
9. Хасанов, О. З. Алгоритмы адаптивного управления и идентификации нелинейных динамических объектов роботизированного технологического комплекса с эталонной моделью и сигнальной адаптацией / О. З. Хасанов, З. М. Хасанов // Вестник УГАТУ. – 2021. – Т. 2. – № 92. – С. 102-111.
10. Sun, X., Zhang, R., Liu, S. et al. A digital twin-driven human-robot collaborative assembly-commissioning method for complex products. Int J Adv Manuf Technol 118, 3389-3402 (2022). <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08211-y>.
11. Исследование особенностей применения метода функциональной декомпозиции при разработке имитационных моделей цифрового двойника роботизированного процесса / М. А. Горькавый, В. П. Егорова, А. И. Горькавый, М. А. Мельниченко // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2022. – № III-1 (59). – С. 27-34.



12. Анализ электромеханических систем методами имитационного моделирования / С. Н. Иванов, К. К. Ким, А. А. Просолович, М. И. Хисматулин // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № III-1 (51). – С. 29-38.
13. Концепция формирования управляющей программы для роботизированного комплекса лазерной сварки / С. И. Сухоруков, С. П. Черный, А. С. Мешков, Д. А. Киба // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № VII-1 (47). – С. 26-33.
14. Maruyama, T. Digital Twin-Driven Human Robot Collaboration Using a Digital Human / T. Ueshiba, M. Tada, H. Toda, Y. Endo, Y. Domaе, Y. Nakabo, T. Mori, K. Suita // Sensors. – 2021. – 21. – 8266. – DOI: 10.3390/s21248266.
15. Atef A. Ata Energy Consumption-Based Trajectory Planning for Manipulators / Atef A. Ata // Advances in Transdisciplinary Engineering. – 2022. – V. 25. – P. 119-124. DOI:10.3233/ATDE220577.
16. Hansen, C.; Oltjen, J.; Meike, D.; Ortmaier, T. Enhanced approach for energy-efficient trajectory generation of industrial robots. In Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), Seoul, Korea, 20-24 August 2012; p. 1-7.
17. Field, G.; Stepanenko, Y. Iterative dynamic programming: An approach to minimum energy trajectory planning for robotic manipulators. In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Minneapolis, MN, USA, 22-28 April 1996; Vol. 3, p. 2755-2760.
18. Vysocký A. et al. Reduction in robotic arm energy consumption by particle swarm optimization // Applied Sciences. – 2020. – T. 10. – № 22. – С. 8241.
19. Paryanto P., Brossog M., Kohl J., Merhof J., Spreng S., Franke J. (2015) Reducing the energy consumption of industrial robots in manufacturing systems. Int J Adv Manuf Technol 78:1315-1328.
20. Garcia, R. R., Bittencourt, A. C. & Villani, E. Relevant factors for the energy consumption of industrial robots. J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng. 40, 464 (2018). <https://doi.org/10.1007/s40430-018-1376-1>.