

УДК 004.8:519.68

**КОМПЛЕКСНОЕ ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ОБУЧЕНИЕМ СВАРЩИКОВ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМОВ РОЕВОГО ИНТЕЛЛЕКТА И ЭВОЛЮЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ\*****Е.В. Заровчатская<sup>1</sup>, А.Е. Мисник<sup>1</sup>, О.Е. Аверченков<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования «Белорусско-Российский университет»  
Республика Беларусь, 212000, г. Могилев, проспект Мира, 43

<sup>2</sup>Филиал ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске  
214013, РФ, г. Смоленск, Энергетический проезд, дом 1

E-mail: 2415719@gmail.com, anton@misnik.by, aver22@rambler.ru

**Аннотация.** Рассматриваются методы комплексного повышения эффективности управления обучением сварщиков с использованием алгоритмов роевого интеллекта и эволюционного моделирования. Описывается информационно-измерительная и управляющая система, которая автоматизирует оценку опыта и качества работы сварщиков, позволяя объективно распределять задания и улучшать процессы обучения. Ключевую роль в системе играют алгоритмы роевого интеллекта (алгоритмы пчел, муравьиной колонии и светлячков), которые обеспечивают оптимальный выбор учебных курсов и траекторий обучения сварщиков. Эти алгоритмы помогают рационализировать образовательные пути и выбирать наиболее подходящие курсы для каждого сварщика, что способствует минимизации времени обучения и повышению качества подготовки.

Алгоритмы эволюционного моделирования помогают эффективно распределять сварочные работы среди специалистов, основываясь на их производительности и качестве выполненных работ. Описаны этапы идентификации и измерения дефектов сварочных швов, оценки качества сварочных работ, прогнозирования дефектов и повышения эффективности управления обучением. Рассмотрены вопросы применения нейронных сетей для анализа дефектов сварных швов для улучшения точности оценки и автоматизации процессов контроля качества.

Практическая апробация была проведена в ОАО «БЕЛГАЗСТРОЙ» и ООО «ИНВЕСТАП-МАИНД», что показало сокращение времени обучения на 20–30 % и аналогичное уменьшение количества дефектов сварных соединений. Эти результаты подтверждают эффективность предложенного подхода и возможность его применения в промышленности для повышения качества сварочных работ и подготовки сварщиков.

**Ключевые слова:** обучение сварщиков, дефект сварного соединения, информационно-измерительная и управляющая система, нейронные сети



© Автор(ы), 2024

\*Елена Владимировна Заровчатская, старший преподаватель кафедры «Программное обеспечение информационных технологий».

Антон Евгеньевич Мисник, кандидат технических наук, доцент кафедры «Программное обеспечение информационных технологий».

Олег Егорович Аверченков, кандидат технических наук, доцент кафедры «Вычислительная техника»

## **Введение**

Сварочное производство представляет неотъемлемую часть машиностроительного комплекса, обеспечивая соединение металлических компонентов с высокой прочностью и надежностью. Сварка является одним из основных процессов при строительстве теплотрасс, нефте- и газопроводов. Большинство неразъемных соединений выполняются с помощью сварки. Качество сварочных работ зависит от опыта работы и квалификации сварщиков, распределения сварочных работ между исполнителями. Эффективность сварочного производства зависит от применения современных технологий сварки, обучения сварщиков новым технологиям и видам сварочных работ, соответствия квалификации сварщиков выполняемым видам работ, рационального распределения работ между исполнителями.

Организация процессов обучения сварщиков, оценка их опыта и качества выполнения работ, назначение сварщиков на работы непосредственно связаны с принятием управленческих решений [1–5]. Перечисленные задачи могут решаться различными способами. Однако большинство способов, основанных на применении опыта руководителей сварочных производств, связаны с субъективными оценками работ и не позволяют объективно оценить весь опыт работы и квалификацию сварщика из-за необходимости обработки большого количества данных обо всех работах и обучении сварщиков. Одним из наиболее перспективных подходов к решению задач повышения эффективности процессов обучения сварщиков, объективной и непредвзятой оценки их опыта и качества выполнения работ, распределения работ между сварщиками является создание информационно-измерительной и управляющей системы сварочного производства. Информационно-измерительный уровень системы на основе методов и средств визуально-измерительного (ВИК), рентгенографического (РК) и ультразвукового контроля (УЗК) с автоматизацией анализа каждого сварного шва обеспечит возможность объективной непредвзятой оценки опыта работы и результатов обучения каждого сварщика на основе автоматического анализа большого объема данных. Управляющий уровень системы предназначен для повышения эффективности процессов обучения сварщиков на основе алгоритмов речевого интеллекта и распределения работ между исполнителями на основе эволюционного моделирования [6–8].

### **Методика комплексного повышения эффективности информационно-измерительных и управляющих систем обучения сварщиков**

Повышение эффективности обучения сварщиков и распределение заданий между ними предлагается реализовывать на основе разработанной авторами методики. Структурная схема работы информационно-измерительной и управляющей системы (ИИиУС) повышения эффективности управления обучением сварщиков представлена на рис. 1.

Предварительно в ИИиУС вносятся все необходимые сведения о сварщиках и результатах выполненных ими ранее работ. Для реализации повышения эффективности сварочного производства при выполнении новых заданий следует проходить по следующим этапам.

ЭТАП 1. Идентификация и измерение размеров дефектов сварочных швов каждого сварщика с занесением в ИИиУС.

Шаг 1.1. Идентификация и измерение дефектов сварочных швов в процессе ВИК.

Шаг 1.2. Проведение и анализ результатов РК с использованием сверточных нейронных сетей.

Шаг 1.3. Измерение и идентификация дефектов сварочных швов в процессе УЗК.

ЭТАП 2. Оценка качества сварочных швов каждого сварщика на основе результатов измерений.

Шаг 2.1. Анализ результатов ВИК на основании методик, представленных в нормативно-технической документации [9].

Шаг 2.2. Анализ результатов РК на основании методик, представленных в нормативно-технической документации [10].

Шаг 2.3. Анализ результатов УЗК на основании методик, представленных в нормативно-технической документации [11].

Шаг 2.4. Комплексная оценка качества сварочных швов.

ЭТАП 3. Оценка качества распределения сварочных работ руководителем на основе прогноза появления дефектов сварочных швов.

Шаг 3.1. Оценка количества и размеров дефектов сварочных швов, выполненных каждым сварщиком, в разрезе сварочных работ.

Шаг 3.2. Прогнозирование появления дефектов сварочных швов для каждого сварщика в разрезе запланированных работ.

Шаг 3.3. Оценка качества распределения сварочных работ на основании суммарного количества дефектов сварочных швов.

ЭТАП 4. Повышение эффективности управления распределением сварочных работ на основе эволюционного моделирования.

Шаг 4.1. Определение технологий сварки в соответствии с требованием заказчика.

Шаг 4.2. Определение оборудования и инструментов для сварки в соответствии с заданием заказчика.

Шаг 4.3. Отбор (селекция) сварщиков на основании эволюционного моделирования с учетом количества дефектов сварочных швов в предыдущих работах и требований, предъявляемых заказчиком.

Шаг 4.4. Сварщики, прошедшие отбор, могут приступать к выполнению поставленной задачи; не прошедшие отбор сварщики должны пройти обучение и повторную аттестацию.

ЭТАП 5. Повышение эффективности управления обучением сварщиков на основе алгоритмов роевого интеллекта.

Шаг 5.1. Оценка количества и размеров дефектов сварочных швов, выполненных каждым сварщиком, в соответствии с востребованными технологиями и видами работ.

Шаг 5.2. Ранжирование сварщиков по критерию минимизации количества дефектов сварочных соединений в ИИиУС.

Шаг 5.3. Выбор перспективной технологии сварочного производства, востребованной у заказчика.

Шаг 5.4.1. Составление списка всех обучающих курсов по востребованным технологиям на данный момент времени.

Шаг 5.4.2. Выборка из списка сварщиков, выступающих в роли «пчел-фуражистов», в алгоритме роевания пчел и прохождения обучения на всех курсах в ИИиУС.

Шаг 5.4.3. Ранжирование курсов на основании работы алгоритма роения пчел по критерию минимизации затраченного времени и наивысшим результатам обучения в ИИиУС.

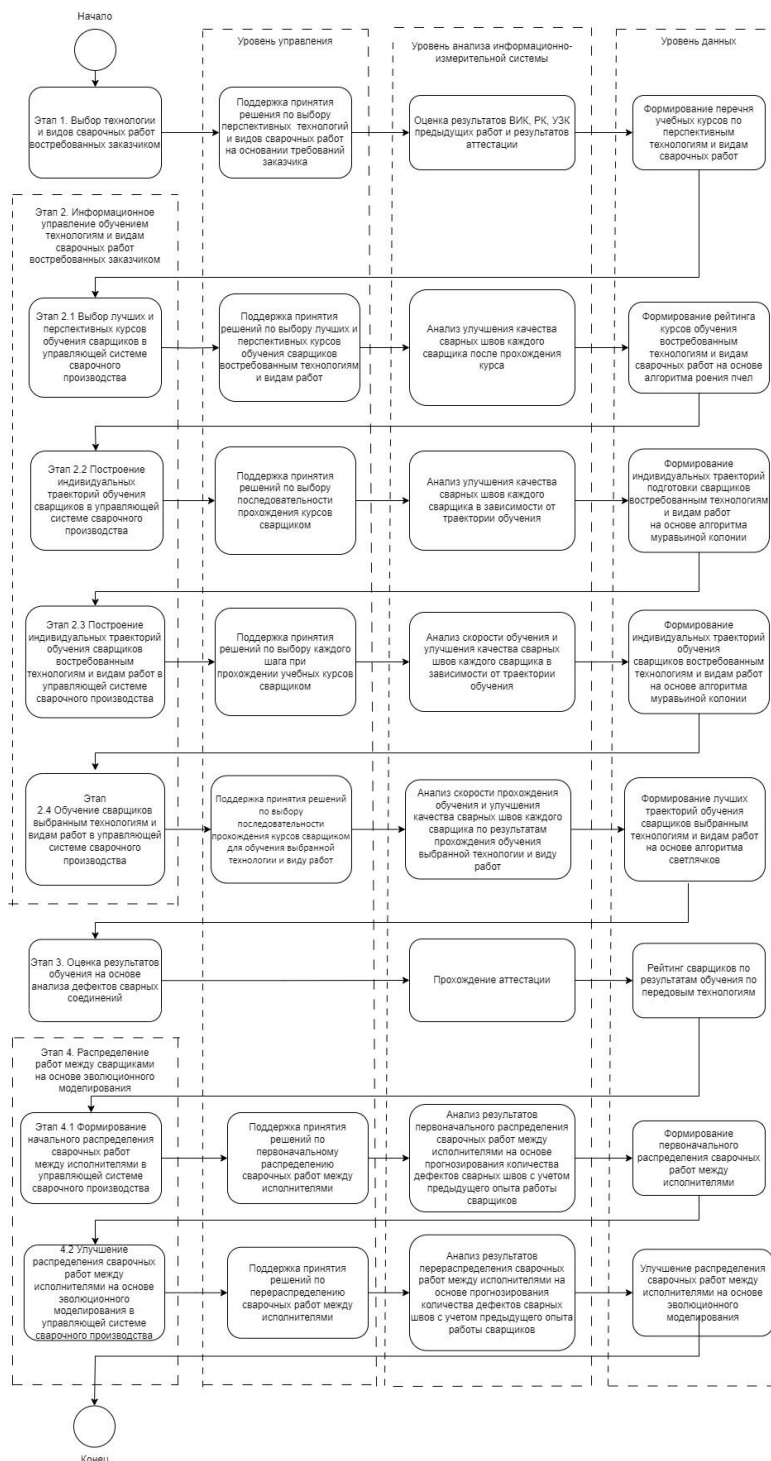


Рис. 1. Структурная схема методики повышения эффективности управления обучением сварщиков

Шаг 5.4.4. Выбор лучших и перспективных курсов.

Шаг 5.5. Построение траектории подготовки большого числа сварщиков по выбранным заказчиком технологиям на основе алгоритма муравьиной колонии.

Шаг 5.5.1. Последовательное прохождение сварщиками курсов с наивысшими рейтингами.

Шаг 5.5.2. Проведение аттестации сварщиков по результатам обучения с занесением данных в ИИиУС.

Шаг 5.5.3. Ранжирование сварщиков, прошедших обучение, для минимизации затраченного времени и снижения количества дефектов по сравнению с периодом до обучения.

Шаг 5.5.4. Формирование в ИИиУС на основе алгоритма муравьиной колонии рациональной последовательности прохождения курсов, позволяющей добиться нужного качества обучения сварщиков по запросу заказчика за минимально короткий срок.

Шаг 5.5.5. Распределение работ между сварщиками с более высоким рейтингом.

Шаг 5.6. Построение траектории подготовки сварщиков, ориентированных на обучение конкретным технологиям и видам сварочных работ на основе применения алгоритма светлячков.

Шаг 5.6.1. Формирование потребностей в видах сварочных работ.

Шаг 5.6.2. Выбор лучших и перспективных курсов по конкретной технологии.

Шаг 5.6.3. Обучение сварщика на курсах.

Шаг 5.6.4. Проведение аттестации сварщика по результатам обучения с занесением данных в ИИиУС.

Шаг 5.6.5. Ранжирование сварщиков после обучения в ИИиУС.

Шаг 5.6.6. Распределение на работу сварщика с более высоким рейтингом по конкретной технологии.

ЭТАП 6. Уточнение распределения сварочных работ после обучения сварщиков на основе эволюционного моделирования

Возврат на ЭТАП 4 с новыми исходными данными для ранжирования сварщиков.

### **Способ повышения эффективности управления обучением сварщиков на основе роевого интеллекта и эволюционного моделирования**

При управлении компонентами ИИиУС перспективным является применение методов и технологий искусственного интеллекта [12, 13]. В частности, алгоритмы роевого интеллекта, которые описывают коллективное поведение множества, состоящего из отдельных самостоятельных элементов, взаимодействующих между собой и окружающей средой, могут эффективно применяться при обучении сварщиков [14–16]. На основе алгоритмов роевого интеллекта возможен рациональный выбор параметров процессов обучения, поиск лучших и наиболее перспективных курсов, построение индивидуальных траекторий обучения. Для рационального распределения работ между сварщиками перспективным является применение эволюционного моделирования.

Разработанный способ повышения эффективности управления сварочными производствами включает четыре этапа:

Этап 1. Выбор технологий и видов сварочных работ, которым необходимо обучить сварщиков.

Этап 2. Управление процессами обучения сварщиков с использованием алгоритмов роевого интеллекта в информационно-измерительной системе сварочного производства.

Этап 3. Анализ результатов работы сварщиков в информационно-измерительной системе сварочного производства.

Этап 4. Управление процессом распределения работ между сварщиками на основе эволюционного моделирования.

Каждый этап содержит процессы на уровне анализа информационно-измерительных показателей, на уровне управления, на уровне оценки результатов.

*Этап 1.* Выбор технологии и видов сварочных работ, которым необходимо обучить сварщиков.

Цель обучения сварщиков востребованным технологиям сварочного производства – подготовка специалистов, владеющих современными технологиями сварки, которые необходимы предприятию.

Принятие решения по выбору технологии сварки исполнителями и руководителями сварочных работ осуществляется на основании следующей информации:

$$Tech = \langle VW_{Tech}, IW_{Tech}, QW_{Tech}, SW_{Tech}, DW_{Tech} \rangle, \quad (1)$$

где  $VW_{Tech}$  – вакансии сварщиков по технологии или виду сварочных работ на рынке труда, ед.;  $IW_{Tech}$  – внутренний спрос на сварщиков по технологии или виду сварочных работ на предприятии, ед.;  $QW_{Tech}$  – количество сварщиков, обучающихся в данный момент времени технологии сварки или виду сварочных работ, ед.;  $SW_{Tech}$  – траектория обучения сварщиков, изучающих технологию сварки или вид работ;  $DW_{Tech}$  – допустимые дефекты для технологии сварки или вида сварочных работ, ед.

В зависимости от выбранных технологий и видов сварочных работ осуществляется выбор множества сварщиков ( $WELDER_x$ ), которых следует обучать новым технологиям и видам сварочных работ.

Оценка качества сварочных работ каждого конкретного  $i$ -го сварщика происходит в информационно-измерительной системе контроля сварочных работ на основании результатов ВИК, РК, УЗК выполненных ранее работ, которые сравниваются с востребованными технологиями и видами работ. Качество сварочных работ считается удовлетворительным, если выполняются следующие условия:

$$dw_{Gi} \leq dw_{Xi}, pww_{Gi} \leq pww_{Xi}, \quad (2)$$

где  $dw_{Gi}$  – множество дефектов сварных швов, допускаемых заказчиком, ед.;  $dw_{Xi}$  – множество дефектов сварных швов после обучения, ед.;  $pww_{Gi}$  – множество выполняемых сварочных работ, требуемых заказчиком, ед.;  $pww_{Xi}$  – множество выполняемых сварочных работ до обучения, ед.

Сварщики, для которых условия (2) выполняются, могут приступать к выполнению работ без обучения. Сварщики, для которых эти условия не выполняются, должны пройти обучение востребованным технологиям и видам работ. Анализ результатов ВИК, РК, УЗК выполняется средствами информационно-измерительной системы сварочного производства, компонентом которой является программный комплекс WELDINGTRAINING [17], обеспечивающий объективную непредвзятую оценку качества сварных швов в процессе обучения сварщиков.

Функция качества обучения каждого сварщика, позволяющая максимально удовлетворить требования заказчика, принимает вид

$$\left(1 - \sum_i \delta_i \cdot \left( \frac{pww_{Gi}}{\max(pww_{Gi})} - \frac{pww_{Yi}}{\max(pww_{Yi})} \right) + \sum_j \delta_j \cdot \left( \frac{dw_{Gj}}{\max(dw_{Gj})} - \frac{dw_{Yj}}{\max(dw_{Yj})} \right) \right) \rightarrow \max, \quad (3)$$

где  $\delta_{i(j)}$  – значимость для заказчика  $i$ -й ( $j$ -й) характеристики сварщика;  $pww_{Yi}$  – множество выполняемых сварочных работ после обучения, ед.;  $dw_{Yi}$  – множество дефектов сварных швов после обучения, ед.

Целевая функция, минимизирующая число необученных сварщиков, может быть представлена в следующем виде:

$$|WELDER_X| - |WELDER_Y^f(P_{ASI})| \rightarrow \min, \quad (4)$$

где  $WELDER_X$  – множество сварщиков до начала обучения;  $WELDER_Y^f(P_{ASI})$  – множество сварщиков, успешно прошедших подготовку.

*Этап 2.* Управление процессами обучения сварщиков с использованием алгоритмов роевого интеллекта в информационно-измерительной системе.

На основании требований заказчика выбираются перспективные технологии, которым следует обучить все множество сварщиков. Функция качества выбора технологий и видов работ, которым необходимо обучить сварщика с учетом его предыдущего опыта работы:

$$\sum_i \delta_i \cdot (pww_{Gi} - pww_{Xi}) \rightarrow \min, \forall i : pww_{Xi} \leq pww_{Gi}. \quad (5)$$

Целевая функция для поддержки принятия решения по выбору технологий и видов сварочных работ, по которым следует проходить обучение:

$$T_i(pww_{Xi} - pww_{Gi}) \rightarrow \min, \forall i : pww_{Xi} \leq pww_{Gi}, \quad (6)$$

где  $T_i$  – время прохождения обучения на  $i$ -м курсе.

Для этого ограниченная по числу участников группа сварщиков проходит подготовку на всех имеющихся курсах. Функция качества процесса управления обучением сварщиков в зависимости от потребностей производства:

$$\sum_i \delta_i \cdot (pww_{Gi} - pww_{Yi}(P_{ASI})) \rightarrow \min, \forall i : pww_{Yi} \leq pww_{Gi}, \quad (7)$$

где  $P_{ASI}$  – множество параметров алгоритма роевого интеллекта.

Целевая функция в процессе управления обучением сварщиков:

$$T_i(pww_{Yi}(P_{ASI}) - pww_{Gi}) \rightarrow \min, \forall i : pww_{Yi} \leq pww_{Gi}. \quad (8)$$

На основании работы алгоритма роевания пчел в системе обучения сварщиков происходит отбор лучших и перспективных курсов по технологиям и видам сварочных работ, востребованных производством, что обеспечивает повышение эффективности управления за счет сокращения времени на обучение сварщиков (рис. 2).

По результатам анализа проводится ранжирование существующих курсов обучения сварщиков. Курсы, на которые сварщики затратили наименьшее количество времени и получили наилучший результат, становятся приоритетными.

Пусть  $\|kurs_{Yij}\|$  – матрица курсов для обучения  $i$ -му виду сварочных работ сварщика, востребованному заказчиком кадров. Тогда функция качества для отбора лучших и перспективных курсов  $\|kurs_{Yij}f\|$  на основе алгоритма роевания пчел:

$$\sum_i \delta_i \cdot \left( dw_{Gi} - dw_{Yi} \left( \|kurs_{Yij}^f\|, P_{BSA} \right) \right) \rightarrow \min, \forall i : dw_{Yi} \leq dw_{Gi}, \quad (9)$$

где  $P_{BSA}$  – множество параметров алгоритма роеения пчел.

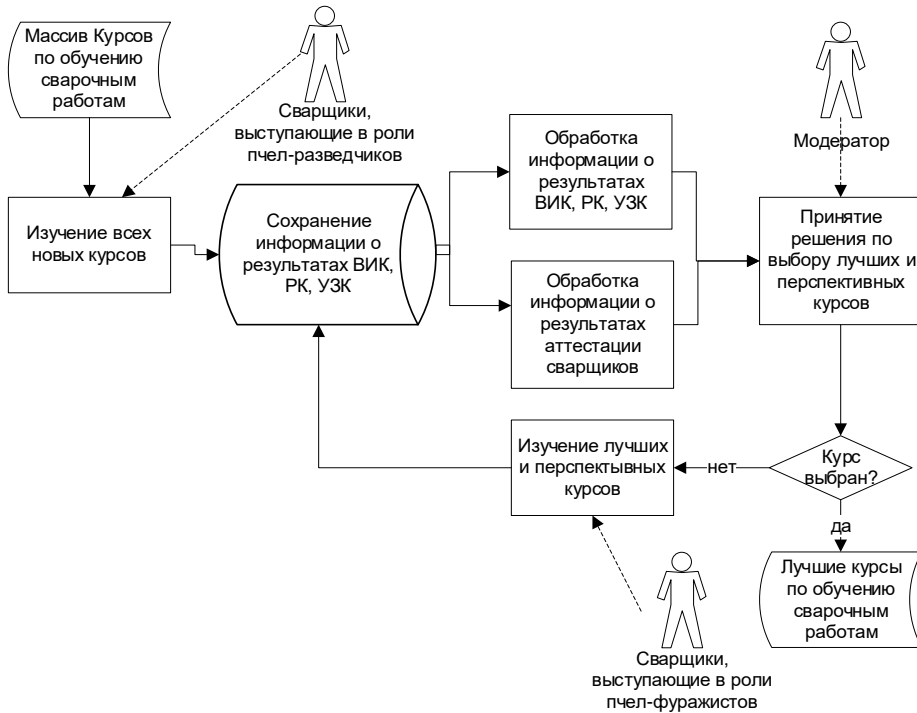


Рис. 2. Схема модифицированного алгоритма роеения пчел для выбора учебных курсов

Целевая функция обеспечивает сокращение времени на обучение сварщиков за счет отбора лучших и перспективных курсов на основе алгоритма роеения пчел:

$$T_i \left( dw_{Yi} \left( \|kurs_{Yij}^f\|, P_{BSA} \right) - dw_{Gi} \right) \rightarrow \min, \forall i : dw_{Yi} \leq dw_{Gi}. \quad (10)$$

С целью отбора курсов сварщики, выступающие в представленном алгоритме в роли «пчел-разведчиков», проходят все имеющиеся по данному виду сварочных работ курсы. После обработки информации о результатах работы сварщиков, прошедших все курсы, в информационно-измерительной системе выполняется анализ дефектов сварных швов, выполненных каждым сварщиком, на основании ВИК, РК, УЗК. Результаты анализа используются для поддержки принятия решений о выборе лучших и перспективных курсов. С целью построения рейтинга отобранных на первом этапе курсов к их изучению приступают сварщики, выполняющие в представленном алгоритме роль «пчел-фуражистов». Принятие решения о выборе лучшего и перспективного курса происходит на основании построенного рейтинга курсов, прохождение которых позволит всем оставшимся сварщикам за минимальное время освоить востребованные технологии и виды сварочных работ и снизить количество дефектов в своей работе.



Для построения траекторий подготовки максимального количества специалистов по запросу заказчика за минимально короткие сроки используется алгоритм муравьиной колонии [19–22] (рис. 3).

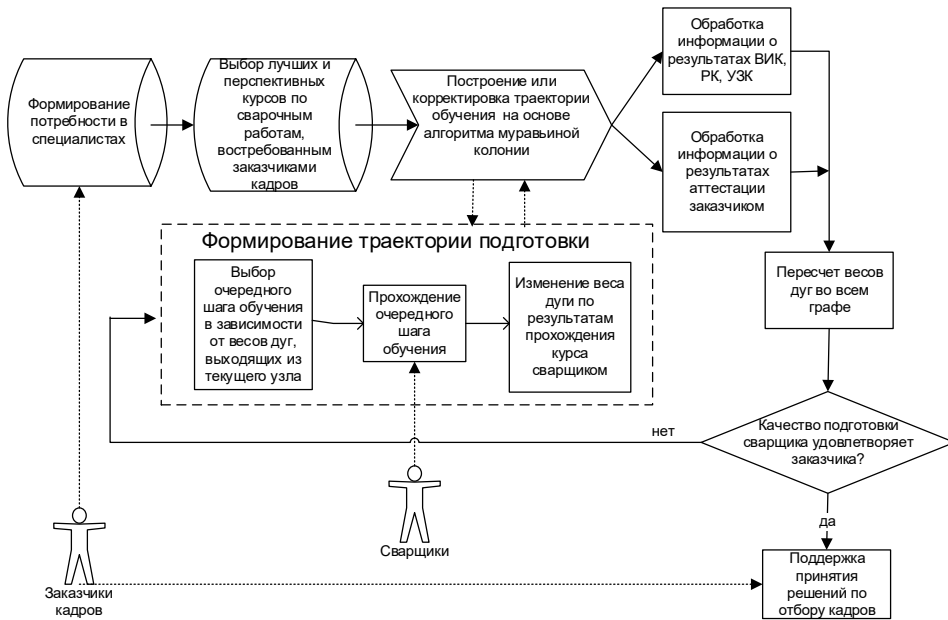


Рис. 3. Схема модифицированного алгоритма муравьиной колонии по формированию траекторий подготовки сварщика

Пусть  $\|Tr_{Y_{jk}}\|_i$  – матрица переходов между курсами для обучения сварщика  $i$ -му виду работ, востребованному заказчиком кадрами. Тогда функция качества для построения рациональной траектории подготовки сварщиков  $\|Tr_{Y_{jk}} f\|_i$  на основе алгоритма муравьиной колонии примет вид

$$\sum_i \delta_i \cdot (dw_{Gi} - dw_{Yi}(\|Tr_{Y_{jk}}\|, P_{ACA})) \rightarrow \min, \forall i: dw_{Yi} \leq dw_{Gi}, \quad (11)$$

где  $P_{ACA}$  – множество параметров алгоритма колонии муравьев.

Целевая функция, обеспечивающая сокращение времени на обучение сварщика за счет отбора лучших траекторий подготовки на основе алгоритма муравьиной колонии, может быть записана как

$$T_i(dw_{Yi}(\|Tr_{Y_{jk}}^f\|, P_{ACA}) \rightarrow dw_{Gi}) \rightarrow \min, \forall i: dw_{Yi} \leq dw_{Gi}. \quad (12)$$

Сварщики последовательно выбирают курсы из предложенного перечня. По итогам изучения курса сварщики проходят аттестацию, результаты которой отражаются в информационно-измерительной системе сварочного производства средствами программного комплекса WELDINGTRAINING [14]. Последовательность прохождения курсов сварщиками запоминается и сохраняется. Чем меньше количество дефектов сварных швов, зафиксированных в ИИиУС с использованием ВИК, РК, УЗК после изучения курса, тем сильнее стремление сварщиков, не прошедших обучение, повысить свою квалификацию для максимального соответствия требованиям заказчика. Траектории обучения сварщиков, закончивших изучение всех курсов по выбранной технологии или виду работ за наименьшее

время, быстро становятся самыми заметными, привлекая внимание наибольшего числа сварщиков. Менее используемые траектории обучения постепенно пропадают.

Результатом работы алгоритма муравьиной колонии является определение рациональной последовательности прохождения курсов, позволяющей добиться нужного качества обучения сварщиков по запросу заказчика за минимально короткий срок.

Для построения траектории подготовки сварщиков, ориентированных на обучение конкретным технологиям и видам сварочных работ, используется алгоритм светлячков [18] (рис. 4).

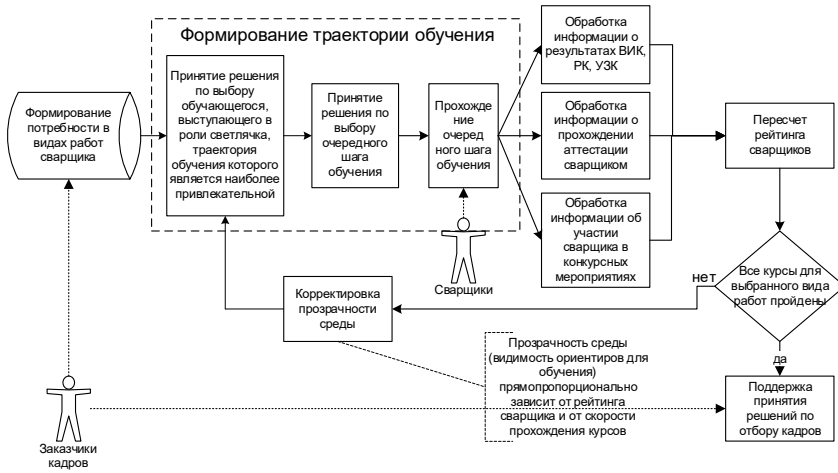


Рис. 4. Схема модифицированного алгоритма светлячков по формированию траекторий подготовки

Пусть  $\|Tr_{Y_{jk}}^f\|_i$  – матрица переходов между курсами для обучения сварщика, выбранного в алгоритме в качестве «светлячка»,  $i$ -й работе. Функция качества подготовки сварщиков путем построения траектории на основе алгоритма светлячков имеет вид

$$\sum_i \left| pww_{Y_i} \left( \|Tr_{Y_{jk}}\|_i, P_{FFA} \right) - pww_{Y_i} \left( \|Tr_{Y_{jk}}^f\|_i \right) \right| \rightarrow \min, \quad (13)$$

где  $P_{FFA}$  – множество параметров алгоритма светлячков.

Целевая функция, обеспечивающая сокращение времени на обучение сварщика работам, соответствующим требованиям заказчика, может быть записана на основе алгоритма светлячков в следующем виде:

$$T_i \left( pww_{Y_i} \left( \|Tr_{Y_{jk}}\|_i, P_{FFA} \right) \rightarrow pww_{Y_i} \left( \|Tr_{Y_{jk}}^f\|_i \right) \right) \rightarrow \min. \quad (14)$$

*Этап 3.* Анализ результатов работы сварщиков в информационно-измерительной системе.

В процессе работы сварщиков осуществляется постоянный контроль качества сварных швов с помощью методов визуального, рентгенографического и ультразвукового контроля (ВИК, РК, УЗК), при этом контролю подлежит каждое сварное соединение по всей его длине (периметру). Результаты всех видов контроля сохраняются в программном комплексе EfficientWelders, являющемся

компонентом информационно-измерительной системы сварочного производства. ВИК проводят для выявления внешних дефектов сварных швов. Визуальный контроль выполняется с двух сторон невооруженным глазом или с применением лупы, измерительный контроль проводят не менее чем в четырех местах, расположенных равномерно по длине сварного шва. Согласно инструкции по визуальному и измерительному контролю [23], ВИК проводят с целью обнаружения выходящих на поверхность трещин, вогнутостей, непроваров, прожогов, наплывов, расслоений, закатов, забоин (вмятин), раковин, шлаковых включений и других дефектов.

После удовлетворительного прохождения ВИК приступают к РК и УЗК для выявления внутренних дефектов. При проведении РК получают рентгеновский снимок на пленке или фотобумаге, где отображено внутреннее состояние сварного соединения. Этим методом определяют поры, шлаковые включения, металлические включения, подрезы, прожоги, картеры. Снимки, полученные в результате РК, распознаются сверточной нейросетью, что позволяет определить вид дефекта и его размеры. Для распознавания дефектов на рентгеновских снимках сварных соединений нейросеть обучается различными методами, в том числе новым методом «переключения задач» в условиях ограниченной доступности данных. Подход к обучению нейронной сети на основе «переключения задач» объединяет небольшое рецептивное поле модели yolov5-s с аугментацией и transfer learning, преодолевая недостаток данных за счет легкой архитектуры и уменьшения дисбаланса данных. Переход к обнаружению дефектов, объединяющий тщательную аугментацию набора данных и настроенную на предварительную обработку, значительно повысил точность модели.

Данные о результатах работы каждого сварщика заносятся в ИИиУС с помощью программного комплекса EfficientWelders. По результатам контроля в реальном времени осуществляется анализ результатов работы каждого сварщика и обновляется рейтинг сварщиков. По результатам анализа результатов работы формируются списки сварщиков, которых необходимо направить на аттестацию или обучение. Результаты анализа работы сварщиков являются исходными данными для распределения сварочных работ между исполнителями.

*Этап 4. Управление процессом распределения работ между сварщиками на основе эволюционного моделирования.*

Управление процессом распределения работ между сварщиками в управляющей подсистеме сварочного производства осуществляется на основе анализа результатов обучения и постоянного контроля качества работы сварщиков в информационно-измерительной подсистеме, времени перемещений сварщиков между объектами работ. При распределении работ между сварщиками с использованием алгоритмов эволюционного моделирования [24] применяются методы и средства визуального, рентгенографического и ультразвукового контроля качества сварных швов.

Структурная схема процесса распределения работ между сварщиками на основе эволюционного моделирования представлена на рис. 5. Для решения задач распределения работ между сварщиками разработаны алгоритмы повышения эффективности управления на основе эволюционного моделирования, обеспечивающие возможность реализации основных принципов и особенностей предложенной концепции.

Задача распределения работ между сварщиками характеризуется множеством работ, которые нужно выполнить (**Tasks**), множеством сварщиков

**Welders**. Каждая работа  $Task = \langle Priority, Tech_{Task}, Complexity_{Task}, P_{DW} \rangle$  характеризуется приоритетом (**Priority**), используемыми технологиями и инструментами ( $Tech_{Task}$ ), сложностью ( $Complexity_{Task}$ ), вероятностью появления дефектов сварных швов ( $P_{DW}$ ).

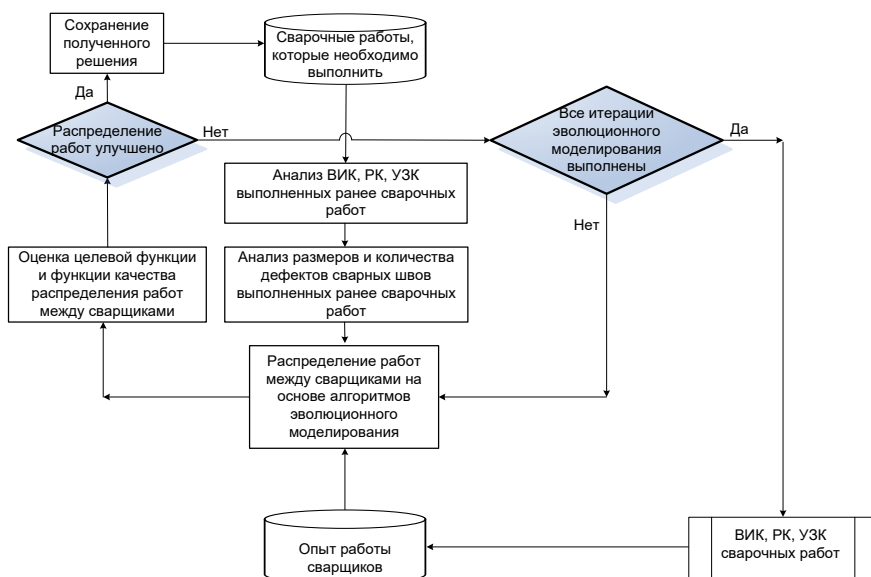


Рис. 5. Структурная схема процесса распределения работ между сварщиками

Функция качества решения проектных задач:

$$P_{DW} = \sum_i \sum_j P_{DW_{ij}} \rightarrow \min, \quad (15)$$

где  $P_{DW_{ij}}$  – вероятность появления дефекта при выполнении  $i$ -й работы  $j$ -м сварщиком, рассчитывается на основании результатов предыдущих работ как отношение количества работ сварщика с недопустимыми дефектами к общему количеству работ сварщика.

Целевая функция задачи повышения эффективности управления распределением работ между сварщиками, используемая в алгоритме эволюционного моделирования:

$$T_{WW} = EvModel(Tasks, Welders) \rightarrow \min, \quad (16)$$

где  $T_{WW}$  – время выполнения сварочных работ, ч.,

Данная целевая функция позволяет подобрать значения параметров распределения сварочных работ, обеспечивающих снижение времени выполнения работ.

### Апробация методики повышения эффективности управления обучением сварщиков

Для определения работоспособности и эффективности применения программного комплекса WELDINGTRAINING при управлении подготовкой сварщиков и программного комплекса EfficientWelders для управления работой сварщиков выполнены испытания на базе инженерно-технического центра ОАО «БЕЛГАЗСТРОЙ», г. Минск, Республика Беларусь.

В процессе проведения испытаний программного комплекса WELDINGTRAINING осуществлялось добавление заданий в программу для выполне-

ния сварщиками, после чего осуществлялось заполнение форм оценки результатов выполнения заданий каждым сварщиком с использованием Web-страниц. После заполнения данных автоматически генерировались протоколы в программном комплексе WELDINGTRAINING (рис. 6).

Анализ результатов проведения сварочных работ																														
Номинация	Количество сварщиков	Количество выявленных дефектов при визуальном-инструментальном контроле															РТ	Радиотрафический контроль		ММ	Механические испытания (для арматуры)									
		используемые материалы и технологии	сварочные процессы	подготовка	УП	упрощенная подготовка	применение инвентарных сварочных швов	применение инвентарных сварочных швов	применение инвентарных сварочных швов	применение инвентарных сварочных швов	применение инвентарных сварочных швов	применение инвентарных сварочных швов	применение инвентарных сварочных швов	применение инвентарных сварочных швов	применение инвентарных сварочных швов	количество дефектов при визуальном-инструментальном контроле	количество дефектов при визуальном-инструментальном контроле	количество дефектов при визуальном-инструментальном контроле	количество дефектов при визуальном-инструментальном контроле	количество дефектов при визуальном-инструментальном контроле	количество дефектов при визуальном-инструментальном контроле	количество дефектов при визуальном-инструментальном контроле	количество дефектов при визуальном-инструментальном контроле	количество дефектов при визуальном-инструментальном контроле						
MIG/MAG (135)	7	5	7	5	3	3	3	4	0	2	3	2	3	6	6	0	5	Х	Х	Х	Х	Х	40	5,714286	3,182358					
TIG (143)	7	2	0	2	1	1	5	3	1	3	4	0	3	3	1	2	1	Х	Х	Х	Х	Х	25	3,571429	1,995211					
MMA (111) (Грубо)	7	0	0	3	1	1	4	1	1	0	2	3	5	7	7	0	1	Х	Х	Х	Х	Х	21	3	1,675978					
MMA (111) (Автомат)	7	0	0	5	0	0	4	0	0	0	3	4	1	3	Х	Х	Х	Х	Х	Х	Х	1	3	20	2,857143	1,596389				
Итого	28	7	7	15	5	5	16	8	2	5	9	6	14	16	14	2	7	4	0	0	0	1	3							

Рис. 6. Протокол итоговой оценки: общая статистика

Формируемые автоматически протоколы итоговых оценок позволили проанализировать количество и частоту появления дефектов сварных соединений у каждого сварщика. Далее при помощи алгоритмов речевого интеллекта осуществлялось управление процессом подготовки каждого сварщика в зависимости от требований заказчика и перспективности технологий сварочных работ. Полученная информация обеспечила сокращение времени обучения сварщиков за счет автоматизации объективной и непредвзятой оценки работы сварщиков членами аттестационных и конкурсных комиссий, автоматизированного анализа и определения ошибок сварщиков, приводящих к образованию дефектов сварных соединений.

Аналогичным образом проводились испытания программного комплекса EFFICIENTWELDERS. В программу добавлялись сварщики и задания, необходимые для выполнения. По результатам выполнения заданий и проведения дефектоскопии заполнялись протоколы ВИК, РК, УЗК.

На основании полученных данных автоматически генерировались списки сварщиков, у которых процент брака в выполненных по заданию сварных соединениях, превышает 10 % или находится в диапазонах 5–10 % или 1–5 %. Данные списки предназначены для эффективного распределения заданий между сварщиками, определения лиц для прохождения переаттестации или обучения с использованием методов эволюционного моделирования.

## Выводы

1. Способ и методика комплексного повышения эффективности обучения сварщиков и распределения работ между ними обеспечивают возможность создания автоматизированных информационно-измерительных и управляющих систем сварочных производств. Повышение эффективности управления сварочными производствами достигается за счет улучшения качества и сокращения времени обучения сварщиков перспективным технологиям и видам работ путем использования алгоритмов речевого интеллекта, сокращения количества дефектов

сварных швов в результате улучшения распределения сварочных работ между исполнителями с применением эволюционного моделирования.

2. Создание программного комплекса WELDINGTRAINING для обучения сварщиков и программного комплекса EfficientWelders для повышения эффективности управления работой сварщиков позволило автоматизировать основные этапы разработанного способа. Испытание программного комплекса WELDINGTRAINING и программного комплекса EfficientWelders в ОАО «БЕЛГАЗСТРОЙ» дало возможность обосновать эффективность применения и автоматизации разработанного способа в производственных условиях, что подтверждается актом производственных испытаний.

3. На основании результатов экспериментальных исследований установлено сокращение времени подготовки сварщиков при использовании программного комплекса WELDINGTRAINING за счет автоматизации обработки информации о результатах ВИК, РК, УЗК, объективной и непредвзятой оценки работы сварщиков в информационно-измерительных системах сварочных производств. Применение программного комплекса WELDINGTRAINING позволяет уменьшить время обучения сварщиков на 20–30 %, что подтверждено актом внедрения в ООО «ИНВЕСТАП-МАИНД».

4. На основании результатов экспериментальных исследований установлено сокращение количества дефектов сварных соединений при использовании программного комплекса EfficientWelders за счет автоматизации обработки и анализа информации о результатах ВИК, РК, УЗК для каждого сварщика в информационно-измерительных системах сварочных производств. Применение программного комплекса EfficientWelders позволяет уменьшить количество дефектов сварных соединений на 20–30 %, что подтверждено актом внедрения в ООО «ИНВЕСТАП-МАИНД».

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Марьина И.С., Файрушин А.М., Мардаганиев М.Р.* Повышение эффективности системы мотивации персонала сварочного производства // Сварка и контроль. Сборник статей. Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет. 2022. С. 125–128.
2. *Федоров В.К.* Управление трудовыми ресурсами в инновационных процессах. М.: РИОР: ИНФРА-М, 2022. 208 с.
3. *Краснопевцева И.В., Краснопевцев А.Ю.* Применение информационных технологий в управлении производительностью труда рабочих промышленных предприятий // Вестник НГИЭИ. 2020. № 2(105). С. 90–99.
4. *Шумейко И.А., Жанбулатова Д.М.* Мероприятия по организации обучения сварочному производству // Наука и техника Казахстана. 2021. № 1. С. 39–48.
5. *Кривоносова Ю.В., Макаров Г.Н.* Управление рисками процесса организации и проведения работ по аттестации сварщиков в соответствии с требованиями ГОСТ р ИСО 9001 – 2015 // Новая наука: Современное состояние и пути развития. 2016. № 10–2. С. 191–194.
6. *Вахнин А.В., Сопов Е.А.* Исследование параметров эволюционного алгоритма для задач параметрической оптимизации функций большой размерности // Решетневские чтения. 2018. Т. 2. С. 252–254.
7. *Вайнилович Ю.В.* Повышение эффективности управления организационными процессами IT-проектов на основе эволюционного моделирования: специальность 05.13.10 «Управление в социальных и экономических системах»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, 2022. 169 с.
8. *Янукович С.П., Борисов В.В., Захарченков К.В.* Концепция повышения эффективности управления образовательными системами на основе адаптивных алгоритмов речевого интеллекта // Информационные технологии. 2020. Т. 26. № 12. С. 706–716.
9. ГОСТ Р ИСО 1763-2014 Контроль неразрушающий. Визуальный контроль соединений, выполненных сваркой плавлением: национальный стандарт Российской Федерации: из-

- дание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 30 сентября 2014 г. № 1241-ст. М.: Стандартинформ, 2015. 21 с.
10. ГОСТ Р ИСО 7512-82 Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Радиографический метод: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 20 декабря 1982 г. № 4923. М.: Стандартинформ, 2019. 27 с.
  11. ГОСТ Р 55724-2013 Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 08 ноября 2013 г. № 1410-ст. М.: Стандартинформ, 2015. 21 с.
  12. *Болотов С.В., Захарченков К.В., Фурманов В.А.* Концепция создания информационных систем автоматического контроля работы сварщиков // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте ИММВ-2022: Сборник научных трудов XI Международной научно-практической конференции. Коломна. 2022. С. 257–268.
  13. Технология повышения эффективности контроля сварочных процессов в интеллектуальной системе Weldingcontrol / *С.В. Болотов, К.В. Захарченков, Е.В. Макаров, В.А. Фурманов* // Энергетика, информатика, инновации – 2021: Сборник трудов XI Международной научно-технической конференции. Смоленск, 2021. С. 227–229.
  14. Метод управления процессом обучения промышленному программированию на основе алгоритмов роевого интеллекта / *В.В. Борисов, С.П. Янукович, К.В. Захарченков, Ю.В. Вайнилович* // Cloud of Science. 2020. Т. 7. № 1. С. 189–206.
  15. *Матренин П.В.* Разработка адаптивных алгоритмов роевого интеллекта в проектировании и управлении техническими системами: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01. Новосибирск, 2018. 197 с.
  16. *Karaboga D.* An idea based on honey bee swarm for numerical optimization // Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department. 2005. 110 p.
  17. Программа управления подготовкой сварщиков WELDINGTRAINING: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023613932 / *М.А. Юденков, Р.А. Агаев, К.В. Захарченков, А.Д. Еремеев, А.В. Лупачев, А.Г. Кротова.* Заявка № 2022682667, дата поступления 23.11.2022, дата регистрации 21.02.2023.
  18. *Yang X.S.* Firefly algorithms for multimodal optimization // In proceedings of the 5th Symposium on Stochastic Algorithms, Foundations and Applications. 2009. Pp. 169–178.
  19. *Лебедев Б.К., Лебедев О.Б., Лебедева Е.М.* Однородная распределительная задача на основе моделей адаптивного поведения муравьиной колонии // Программные продукты и системы. 2017. № 2. С. 217–226.
  20. *Dorigo M., Maniezzo V., Colomi A.* The Ant System: Optimization by a colony of cooperating objects // IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics. 1996. Part B. N. 26(1). Pp. 29–41.
  21. *Dorigo M., Birattari M., Stutzle T.* Ant colony optimization / IEEE Computational Intelligence Magazine 2006 Vol. 1. Is 4. Pp. 28–39.
  22. Using Ant Colony Optimised Algorithms for Shortest Path Exploration by Robots / *A. Singh, S. Dhawan, J. Verma, G. Singh, A. Kaur* // IEEE International Conference on Interdisciplinary Approaches in Technology and Management for Social Innovation (IATMSI). 2024. Vol. 2. Pp. 1–4.
  23. Инструкция по визуальному и измерительному контролю: РД 03-606-03 / [Принимали участие: В.С. Котельников и др.]. М.: Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России, 2003 (Липецк: Тип. ГУП Липец. изд-во). 101 с.
  24. *Kita E. (ed.).* Evolutionary Algorithms. InTech. 2011. 596 p.

*Статья поступила в редакцию 25 января 2024 г.*

# METHOD FOR COMPLEX INCREASE OF WELDING PRODUCTION CONTROL EFFICIENCY BASED ON SWARM INTELLIGENCE ALGORITHMS AND EVOLUTIONARY MODELING\*

*E.V. Zarovchatskaya<sup>1</sup>, A.E. Misnik<sup>1</sup>, O.E. Averchenkov<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Interstate educational institution of higher education  
“Belarusian-Russian University”  
43, Mira Avenue, Mogilev, 212000, Republic of Belarus

<sup>2</sup>Branch of the Federal State Budgetary Educational Institution  
of Higher Education “National Research University “MPEI” in Smolensk  
building 1, Energeticheskyy proezd, Smolensk, 214013, Russian Federation

E-mail: 2415719@gmail.com, anton@misnik.by, aver22@rambler.ru

**Abstract.** *The article presents comprehensive methods for enhancing the efficiency of welder training management through the implementation of swarm intelligence algorithms and evolutionary modeling. It introduces an information-measurement system that automates the evaluation of welders' experience and work quality, facilitating objective task allocation and the improvement of training processes. Central to this system are swarm intelligence algorithms – specifically, bee algorithms, ant colony algorithms, and firefly algorithms – which optimize the selection of training courses and learning trajectories for welders. These algorithms streamline educational pathways and identify the most suitable courses for each welder, thus reducing training time and enhancing the quality of training.*

*Evolutionary modeling algorithms assist in the efficient allocation of welding tasks among specialists based on their performance and work quality. The article details the processes involved in identifying and measuring weld defects, assessing weld quality, predicting defects, and improving training management efficiency. It also discusses the application of neural networks for weld defect analysis, which enhances assessment accuracy and automates quality control processes.*

*Practical testing was conducted at OAO “BELGAZSTROY” and OOO “INVESTAP-MAIND,” demonstrating a 20–30 % reduction in training time and a corresponding decrease in the number of weld defects. These results validate the effectiveness of the proposed approach and highlight its potential for improving welding work quality and welder training in industrial settings.*

**Keywords:** *welder training, weld joint defect, information and measurement system, neural networks*

## REFERENCES

1. Mar'ina I.S., Fajrushin A.M., Mardaganiev M.R. Povyshenie effektivnosti sistemy motivatsii personala svarochnogo proizvodstva [Increasing the efficiency of the welding personnel motivation system] // Svarka i kontrol': Sbornik statej. Ufa: Ufimskij gosudarstvennyj neftyanoj tekhnicheskij universitet. 2022. Pp. 125–128. (In Russian).
2. Fedorov V.K. Upravlenie trudovymi resursami v innovacionnyh processah [Workforce management in innovative processes]. M.: RIOR : INFRA-M. 2022. 208 p. (In Russian).
3. Krasnopevceva I.V., Krasnopevcev A.Yu. Primenenie informacionnyh tekhnologij v upravlenii proizvoditel'nost'yu truda rabochih promyshlennyh predpriyatij [Application of information



© The Author(s), 2024

\* Elena V. Zarovchatskaya, Senior Lecturer.

Anton E. Misnik, (PhD. Sci. (Techn.)), Associate Professor.

Oleg E. Averchenkov, (PhD. Sci. (Techn.)), Associate Professor.



- technologies in the management of labor productivity of industrial workers] // Vestnik NGIEI. 2020. № 2(105). Pp. 90–99. (In Russian).
4. *Shumejko I.A., Zhanbulatova D.M.* Meropriyatiya po organizacii obucheniya svarochnomu proizvodstvu [Welding training arrangements] // Nauka i tekhnika Kazakhstana. 2021. № 1. Pp. 39–48. (In Russian).
  5. *Krivososova Yu.V., Makarov G.N.* Upravlenie riskami processa organizacii i provedeniya rabot po attestacii svarshchikov v sootvetstvii s trebovaniyami GOST r ISO 9001 – 2015 [Risk management of the process of organization and performance of works on certification of welders in accordance with the requirements of GOST R ISO 9001 – 2015] // Novaya nauka: Sovremennoe sostoyanie i puti razvitiya. 2016. № 10–2. Pp. 191–194. (In Russian).
  6. *Vahnin A. V., Sopov E. A.* Issledovanie parametrov evolyucionnogo algoritma dlya zadach parametricheskoy optimizacii funkciy bol'shoj razmernosti [Investigation of evolutionary algorithm parameters for parametric optimization problems of high-dimensional functions] // Reshetnevskie chteniya. 2018. Vol. 2. Pp. 252–254. (In Russian).
  7. *Vainilovich Yu. V.* Povyshenie effektivnosti upravleniya organizacionnymi processami IT-proektov na osnove evolyucionnogo modelirovaniya [Improving the efficiency of management of organizational processes of IT projects based on evolutionary modeling]: specialty 05.13.10 "Management in social and economic systems": dissertation for the degree of candidate of technical sciences, 2022. 169 p. (In Russian).
  8. *Yanukovych S.P., Borisov V.V., Zakharchenkov K.V.* Koncepciya povysheniya effektivnosti upravleniya obrazovatel'nymi sistemami na osnove adaptivnykh algoritmov roevogo intellekta [Concept of increasing the efficiency of management of educational systems based on adaptive algorithms of swarm intelligence] // Information technologies. 2020. Vol. 26. No 12. Pp. 706–716. (In Russian).
  9. GOST R ISO 1763-2014 Kontrol' nerazrushayushchij. Vizual'nyj kontrol' soedinenij, vypolnennykh svarkoj plavleniem: nacional'nyj standart Rossijskoj Federacii: izdanie oficial'noe: utverzhden i vveden v dejstvie Prikazom Federal'nogo agentstva po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii ot 30 sentyabrya 2014 g. № 1241-st. [Visual inspection of joints made by fusion welding: national standard of the Russian Federation: official publication: approved and put into effect by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology No. 1241-st dated September 30, 2014]. M.: Standartinform, 2015. 21 p. (In Russian).
  10. GOST R ISO 7512-82 Kontrol' nerazrushayushchij. Soedineniya svarnye. Radiograficheskij metod: nacional'nyj standart Rossijskoj Federacii: izdanie oficial'noe: utverzhden i vveden v dejstvie Postanovleniem Gosudarstvennogo komiteta SSSR po standartam ot 20 dekabrya 1982 g. № 4923 [Radiographic method: national standard of the Russian Federation: official publication: approved and put into effect by Decree of the USSR State Committee for Standards of December 20, 1982. No. 4923]. M.: Standartinform, 2019. 27 p. (In Russian).
  11. GOST R 55724-2013 Kontrol' nerazrushayushchij. Soedineniya svarnye. Metody ul'trazvukovy: nacional'nyj standart Rossijskoj Federacii: izdanie oficial'noe : utverzhden i vveden v dejstvie Prikazom Federal'nogo agentstva po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii ot 08 noyabrya 2013 g. № 1410-st [Ultrasonic methods: national standard of the Russian Federation: official publication: approved and put into effect by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology No. 1410-st dated November 08, 2013]. M.: Standartinform, 2015. 21 p. (In Russian).
  12. *Bolotov S.V., Zakharchenkov K.V., Furmanov V.A.* [etc.] Koncepciya sozdaniya informacionnykh sistem avtomaticheskogo kontrolya raboty svarshchikov [The concept of creating information systems for automatic control of welders work] // Integrirovannye modeli i myagkie vychisleniya v iskusstvennom intellekte IMM-2022, Kolomna, 2022. Pp. 257–268. (In Russian).
  13. Tekhnologiya povysheniya effektivnosti kontrolya svarochnykh processov v intellektual'noj sisteme weldingcontrol [Technology for increasing the efficiency of control of welding processes in the intelligent system weldingcontrol] / *S.V. Bolotov, K.V. Zakharchenkov, E.V. Makarov, V.A. Furmanov* // Energetika, informatika, innovacii – 2021. Smolensk, 2021. Pp. 227–229. (In Russian)
  14. Metod upravleniya processom obucheniya promyshlennomu programmirovaniyu na osnove algoritmov roevogo intellekta [A method for managing the process of teaching industrial programming based on swarm intelligence algorithms] / *V.V. Borisov, S.P. Yanukovych, K.V. Zakharchenkov, Yu.V. Vainilovich* // Cloud of Science. 2020. Vol. 7. No 1. Pp. 189–206. (In Russian).

15. *Matrenin P.V.* Razrabotka adaptivnyh algoritmov roevogo intellekta v proektirovanii i upravlenii tehnikeskimi sistemami [Development of adaptive algorithms for swarm intelligence in the design and management of technical systems]: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.13.01: Novosibirsk Publ 2018. 197 p. (In Russian).
16. *Karaboga D.* An idea based on honey bee swarm for numerical optimization // Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department. 2005. 110 p.
17. Programma upravleniya podgotovkoj svarshchikov WELDINGTRAINING: svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EVM №2023613932 [WELDINGTRAINING welder training management program: certificate of state registration of the computer program №2023613932] / *Yudenkov M.A., Agaev R.A., Zaharchenkov K.V., Eremeev A.D., Lupachev A.V., Krotova A.G.* Application No. 2022682667, date of receipt 11/23/2022, registration date 02/21/2023. (In Russian).
18. *Yang X.S.* Firefly algorithms for multimodal optimization // In proceedings of the 5th Symposium on Stochastic Algorithms, Foundations and Applications. 2009. Pp. 169–178.
19. *Lebedev B.K., Lebedev O.B., Lebedeva E.M.* Odnorodnaya raspredelitel'naya zadacha na osnove modelej adaptivnogo povedeniya murav'inoj kolonii [Homogeneous distribution problem based on models of adaptive behavior of an ant colony] // Software products and systems 2017. № 2. Pp. 217–226. (In Russian).
20. *Dorigo M., Maniezzo V., Colomi A.* The Ant System: Optimization by a colony of cooperating objects // IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics. 1996. Part B. N. 26(1). Pp. 29–41.
21. *Dorigo M., Birattari M., Stutzle T.* Ant colony optimization / IEEE Computational Intelligence Magazine 2006 Vol. 1. Is 4. Pp. 28–39.
22. Using Ant Colony Optimised Algorithms for Shortest Path Exploration by Robots / *A. Singh, S. Dhawan, J. Verma, G. Singh, A. Kaur* // IEEE International Conference on Interdisciplinary Approaches in Technology and Management for Social Innovation (IATMSI). 2024. Vol. 2. Pp. 1–4.
23. Instrukciya po vizual'nomu i izmeritel'nomu kontrolyu: RD 03-606-03 [Instructions for visual and measuring control: RD 03-606-03] // [Participated in: V.S. Kotelnikov and others]. M.: Scientific and technical. Center for Industrial Safety of Gosgortekhnadzor of Russia, 2003 (Lipetsk: Type. State Unitary Enterprise Lipetsk Publishing House). 101 p. (In Russian).
24. *Kita E. (ed.)* Evolutionary Algorithms. InTech. 2011. 596 p.

*Original article submitted 25.01.2024*