
Секция 6

**ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ
СИСТЕМЫ, ФРЕЙМВОРКИ
ДЛЯ СОЗДАНИЯ
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ
СИСТЕМ. ТЕХНОЛОГИИ
ПРОЕКТИРОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ
СИСТЕМ. ПРИКЛАДНЫЕ
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ
СИСТЕМЫ**

УДК 004.822

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ АППАРТНО-ПРОГРАММНАЯ
ПОДДЕРЖКА И ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ
СВАРОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ**

С.В. Болотов (*s.v.bolotov@mail.ru*)
К.В. Захарченков (*zaharchenkovkv@mail.ru*)
С.К. Крутолевич (*s_krutolevich@tut.by*)
Белорусско-Российский университет, Могилёв

Проблема повышения эффективности сварочных процессов на современных машиностроительных предприятиях неразрешима без применения аппаратно-программных комплексов, позволяющих отслеживать в реальном масштабе времени параметры работы каждого сварщика, однако, помимо отслеживания и журналирования та-

ких работ, крайне важным является рациональный подбор параметров сварочного процесса – фактически, необходимым компонентом таких комплексов становятся интеллектуальные помощники технологов, основанные, в том числе, и на нейросетевых технологиях. В данной статье рассматривается комплексный подход к аппаратно-программному сопровождению сварочных процессов, описывается разработанное аппаратное и программное обеспечение, а так же нейросетевой подход к подбору рациональных параметров сварочного процесса.

Ключевые слова: сварочные процессы, аппаратно-программные комплексы, нейронные сети, LSTM.

Введение

В настоящее время на крупных машиностроительных предприятиях актуальной является проблема повышения эффективности управления сварочными процессами с использованием интеллектуальных технологий. Актуальность проблемы может быть количественно оценена низким значением коэффициента эффективности использования сварочного оборудования, что обусловлено:

- 1) необходимостью частого переключения режимов работы;
- 2) перемещениями сварщиков между швами для выполнения заданий;
- 3) отсутствием технологических инструкций, однозначно определяющих оптимальные параметры сварочных процессов для каждого прохода каждого сварного шва каждого изделия, узла, детали;
- 4) нарушением сварщиками режимов сварки швов, приводящим к появлению дефектов сварных соединений и в результате к появлению брака.

Нарушение сварщиками режимов с целью ускорения выполнения работ и выполнения большего объема работ в течение рабочего времени на предприятиях машиностроения встречается достаточно часто и является серьезной проблемой [Burlaka et al., 2019]. Отклонение температуры предварительного подогрева, силы тока и напряжения на дуге от нормативных значений приводит к образованию дефектов сварных соединений. Выход из строя узлов и деталей машин в процессе эксплуатации из-за разрушения сварных швов приводит к необходимости ремонта в «полевых» условиях, который не всегда возможен [Khmelev et al., 2018]. Результатом является выход машины из строя на длительный период времени, срывы планов и сроков работ, уплата штрафов и неустоек, потеря деловой репутации потребителей и завода-производителя. Кроме того, найти ответственного за сварку шва, вызвавшего выход из строя узла или детали, по истечении некоторого периода времени при отсутствии автоматизации также достаточно сложно. Решением данной проблемы являет-

ся создание эффективной системы регистрации сварочных процессов, обеспечивающей идентификацию каждого сварщика с использованием удостоверений с RFID-метками, автоматический интеллектуальный контроль выхода параметров сварочных процессов за пределы допустимых значений как со стороны сварщика в реальном времени, так и со стороны мастера и контролера путем интеллектуальной оценки результатов выполнения сварочных работ на основании паспортов сварных швов.

Отсутствие экспериментально подтвержденных исследований и методик создания технологических инструкций, определяющих оптимальные диапазоны параметров сварочных процессов, приводит к тому, что технологические инструкции создают технологи, которые не всегда являются экспертами в области решения подобных задач. В результате диапазоны допустимых значений параметров сварочных процессов устанавливаются достаточно широкими, и попадание значений параметров сварочных процессов в диапазоны, установленные технологической инструкцией, не гарантирует качество сварного соединения [Lin et al., 1997]. Некорректный выбор диапазонов допустимых значений параметров сварочных процессов приводит к систематическому появлению дефектов сварных соединений и брака. Одним из путей решения данной проблемы является создание методики интеллектуального анализа дефектов сварных соединений для выбора оптимальных диапазонов допустимых значений параметров сварочных процессов для каждого сварного шва каждого изделия, узла и детали.

Комплексная оценка эффективности работы оборудования осуществляется на основе коэффициента ОЕЕ (Overall Equipment Efficiency). Данный коэффициент учитывает доступность и производительность оборудования, качество продукции [Lindgren, 2011]. Комплексная оценка эффективности работы оборудования позволяет определить пути повышения количества времени выполнения сварочных работ за счет сокращения простоев, переналадок, устранения брака.

1. Аппаратная часть



Рис. 1. Регистратор сварочных процессов РСП-БРУ-01

Регистратор сварочных процессов РСР-БРУ-01 включает три основных блока:

- основной блок обеспечивает идентификацию сварщиков с использованием RFID-меток, автоматическое получение с сервера, на котором развернута система, сменных заданий, закрепленных мастером за каждым сварщиком, выбор сварщиком заданий для исполнения, регистрацию и усреднение значений параметров сварки, полученных с блока датчиков, с последующей передачей через GSM связь или WI-FI на сервер для последующей обработки;
- блок датчиков обеспечивает регистрацию сварочного тока и напряжения на дуге с точностью $\pm 1,5\%$ и передачу сигнала в основной блок регистратора. Экспериментально установлено, что для исследования процессов дуговой сварки плавящимся электродом оптимальной частотой опроса при измерениях регистратором сварочного тока и напряжения на дуге является 10-20 кГц. При этом сохранение данных о параметрах режима сварки (усреднение данных) следует проводить с частотой 10 Гц;
- пульт сварщика предназначен для дистанционного переключения сварочных швов (слоёв), звукового оповещения сварщика о выходе параметров режима за установленные пределы, контроля температуры предварительного подогрева.

2. Программная часть

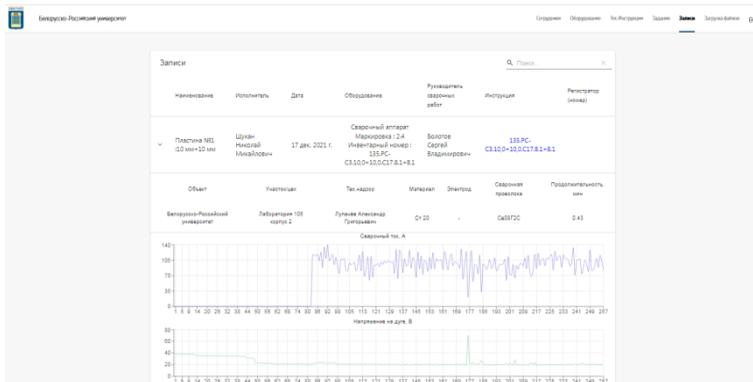


Рис. 2. Программный комплекс сопровождения сварочных процессов

Программная часть автоматизированной системы включает следующие основные модули:

- программный модуль автоматизации работы мастеров. Мастер распределяет задания сварщикам на выполнение каждого шва каждого изделия, узла, детали;
- программный модуль автоматизации работы технологов. Технолог определяет структуру производства (состав изделий, узлов, деталей) и задает допустимые диапазоны значений параметров сварочных процессов для каждого прохода (корневого, заполняющего, облицовочного) каждого изделия, узла и детали. Для технолога актуальными задачами являются: выбор рациональных значений диапазонов параметров сварочных процессов, обеспечивающих минимальную вероятность появления дефектов сварных соединений; рациональный выбор оборудования и материалов, обеспечивающих приемлемое качество соединения при минимальном расходе ресурсов (электроэнергии, газа, сварочной проволоки). Выбор данных значений может осуществляться как в ручном режиме, так и с помощью нейросетевого модуля;
- программный модуль автоматизации работы сварщика. Данный модуль обеспечивает идентификацию сварщика на регистраторе с помощью удостоверения с RFID-меткой, выбор сварщиками заданий на сварку, автоматический контроль параметров сварочного процесса;
- программный модуль автоматизации работы контролера. Контролеры вводят данные о количестве забракованных изделий по результатам визуального, рентгенографического и ультразвукового контроля. При выявлении брака и/или дефектов сварных швов контролеры фиксируют определяют причину брака или выявленных дефектов сварного соединения;
- программный модуль руководителей сварочных работ. На основании анализа паспортов сварных швов и отчёта об эффективности использования оборудования руководителем сварочных работ определяются причины снижения эффективности использования оборудования и разрабатываются способы устранения выявленных причин.

3. Методика повышения эффективности управления сварочными процессами

Методика повышения эффективности управления сварочными процессами с использованием дистанционного контроля состоит из следующих этапов.

1. Ввод с помощью клиентского Web-приложения сменных заданий руководителем сварочных работ (мастером). Распределение заданий между сварщиками определяет количество рабочего времени,

которое каждый сварщик тратит на перемещения между изделиями, узлами, деталями, сварными швами, подлежащими сварке в соответствии со сменными заданиями. При изменении режимов сварки дополнительное рабочее время тратится на переключение режимов сварки. Эффективность распределения заданий между сварщиками определяется на основании отчета о работе оборудования, в котором указывается в минутах и процентах время нахождения сварочного оборудования в каждом из состояний: выключено, включено, сварка, вынужденный простой. Оптимизация распределения заданий между сварщиками обеспечивает сокращение времени простоев оборудования.

2. В системе осуществляется автоматический контроль сроков прохождения аттестации сварщиками. Для выполнения работ в соответствии с технологической инструкцией сварщик должен иметь соответствующую область распространения квалификации, при отсутствии которой сварщик не может быть допущен к выполнению работ. За месяц до истечения срока аттестации система автоматически выделяет цветовой индикацией сварщика, у которого заканчивается срок действия удостоверения об аттестации. Автоматический контроль сроков аттестации сварщиков и соответствия выполняемых работ квалификации обеспечивает повышение качества сварных швов и сокращает количество брака при выполнении сварочных работ.
3. Ввод данных о технологических процессах на каждое изделие в программном модуле технологов. Для каждого технологического процесса вводятся технологические инструкции, содержащие диапазоны допустимых значений контролируемых параметров (температуры предварительного подогрева, силы тока и напряжения на дуге) для каждого прохода (корневого, заполняющего, облицовочного) каждого сварного шва каждого изделия, узла и детали. На данном этапе задача технологов состоит в определении оптимальных и допустимых диапазонов параметров сварочного процесса, обеспечивающих минимизацию количества дефектов сварных соединений.
4. Рациональный выбор сварочного оборудования и материалов для выполнения заданий сварщиками. Выбранное оборудование должно содержать технические характеристики, обеспечивающие допустимые значения параметров сварочных процессов. Выбранные сварочные материалы должны обеспечивать минимизацию дефектов сварных соединений при минимальной стоимости и расходе. Для каждого используемого материала указывается номер партии и акт входного контроля.

5. Сварщиком на регистраторе подтверждает запуск процесса сварки. С использованием термопары, установленной на свариваемом изделии, регистрируется температура предварительного нагрева области сварки. Полученное значение сравнивается с указанным в технологической инструкции для соответствующего прохода сварного шва, соответствующего выбранному ранее заданию. В случае выхода температуры за пределы допустимых значений сварочный процесс не запускается.
6. В процессе сварки с блока датчиков на регистратор и пульт сварщика передаются параметры сварочных процессов (сварочный ток, напряжение на дуге). Переданные с блока датчиков параметры сравниваются с допустимыми значениями, указанными в технологической инструкции для соответствующего прохода.
7. Автоматический контроль простоев оборудования. Регистратором осуществляется постоянный мониторинг состояния сварочного оборудования.
8. Передача данных с регистратора на сервер с использованием GSM или WI-FI канала. В случае отсутствия соединения с сервером параметры сварочных процессов сохраняются в энергонезависимой памяти регистратора с последующей передачей на сервер после восстановления соединения.
9. Выставление оценки сварщику за выполнение каждого прохода (корневого, заполняющего, облицовочного) сварного шва по результатам анализа изменения значений сварочного тока и напряжения на дуге.
10. Формирование паспорта сварного шва для документального подтверждения качества каждого сварного соединения.
11. Визуальный и выборочный неразрушающий контроль (рентген, УЗК) сварных швов.
12. Формирование руководителями отчёта об эффективности использования оборудования.

4. Использование нейросетевого подхода для выбора рациональных значений диапазонов параметров сварочных процессов

На каждом режиме сварочный процесс имеет длительность 150-200 циклов. При использовании классического подхода к проектированию нейронно-сетевой модели, количество входных параметров и, соответственно, размер входного слоя нейронной сети будет достаточно большим, что приведет к снижению производительности нейронной сети [Хайкин, 2006], [Tang et al., 2015].

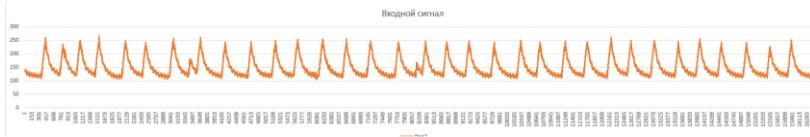


Рис. 3. Пример входного сигнала

Таким образом, желательно уменьшить пространство входных признаков без потери информационной составляющей. Частотный анализ является одним из доступных инструментов, позволяющих выполнить поставленную задачу [Галушкин, 2000], [Мисник и др., 2019].

Для обработки сигнал был разделен на 70 отрезков по 3-4 цикла в каждом.

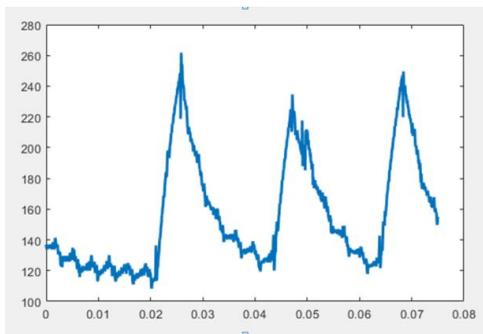


Рис. 4. Пример отрезка цикла для преобразования

Числовой ряд был подвергнут одномерному прямому преобразованию Фурье [Misnik et al., 2018]. График спектральной плотности сигнала представлен на рис. 5.

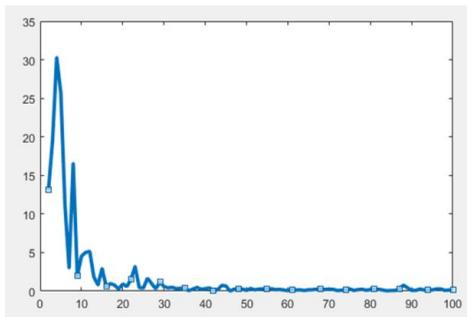


Рис. 5. График спектральной плотности сигнала

Из графика очевидно, что для обучения нейронной сети можно ограничиться диапазоном от 1 до 30 Гц [Misnik et al., 2019a].

Пример значений действительной и мнимой части для первых девяти гармоник представлен в табл. 1.

Таблица 1

Частота	Действительная часть	Мнимая часть
1	-4916,0	6748,8i
2	2205,2	12264,2i
3	18392,6	5836,4i
4	14399,6	7770,9i
5	4867,2	5221,6i
6	1738,1	803,82i
7	8823,6	5782,4i
8	1028,1	723,8i
9	2826,0	570,7i

Поскольку нейросетевому анализу подвергается процесс происходящий в течение определенного времени, каждый следующий шаг которого зависит от текущего шага, были выбраны сети долгой краткосрочной памяти (LSTM) [Misnik et al., 2019b].

Для обучения нейронной сети были созданы обучающие выборки с экспертной оценкой более чем 4 000 сварных швов.

В качестве входных параметров нейронной сети были использованы: тип материала, толщина материала, наличие или отсутствие предварительного прогрева, тип газовой среды и действительная и мнимая часть первых 30 гармоник, соответствующих частотам спектральной плотности сигнала от 1 до 30 Гц.

На выходе нейронной сети формировались рациональные значения напряжения и силы тока для сварочного процесса.

Метрикой качества была выбрана F1-мера. При обучении нейронной сети было достигнуто значение F1-меры в 0,89, что является достаточным для данной задачи. Улучшение данной метрики возможно путём увеличения обучающей выборки.

Заключение

Решением проблемы повышения эффективности управления сварочными процессами является создание эффективной системы регистрации сварочных процессов, обеспечивающей идентификацию каждого сварщика, контроль параметров сварочных процессов и оценку результатов выполнения сварочных работ.

Нейросетевой подход на основе частотного анализа способен обеспечить подбор рациональных параметров сварочного процесса, обеспечивающих приемлемое качество соединения при минимальном расходе ресурсов.

Внедрение интеллектуальных технологий в управлении сварочными процессами на крупных машиностроительных предприятиях может повысить эффективность производства, уменьшить количество брака и снизить затраты на ремонт и обслуживание машин. Кроме того, это позволит улучшить деловую репутацию предприятия и повысить удовлетворенность потребителей продукции.

Список литературы

- [Burlaka et al., 2019] Burlaka V., Lavrova E. Improving energy characteristics of the welding power sources for TIG-AC welding // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2019. – Vol. 5, No. 5-101. – P. 38-43. – DOI: 10.15587/1729-4061.2019.180925. – EDN EFUOHE.
- [Lin et al., 1997] Lin Y.C., Lee K.H. Effect of welding parameters on the residual stress by the parallel heat welding // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 1997. – Vol. 71, No. 2. – P. 197-202. – EDN AITIVN.
- [Lindgren, 2011] Lindgren L.E. Understanding welding stress and distortion using computational welding mechanics // Minimization of Welding Distortion and Buckling: Modeling and Implementation, 2011. – P. 22-78. – DOI: 10.1533/9780857092908.1.22. – EDN PAMKIR.
- [Khmelev et al., 2018] Khmelev V.N., Slivin A.N., Abramov A.D. [et al.]. The ultrasonic device and the positioning system of the welding tool for welding of automobile bumpers // International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM: EDM 2018 - Proceedings, Erlagol, Altai, 29 июня – 03 2018 года. – Erlagol, Altai: IEEE Computer Society, 2018. – P. 318-321. – DOI: 10.1109/EDM.2018.8435068. – EDN YBXSbv.
- [Misnik et al., 2018] Misnik A., Krutalevich S., Prakapenka S. [et al.]. Neural network approximation precision change analysis on cryptocurrency price prediction // Fuzzy Technologies in the Industry - FTI 2018: Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference, Ulyanovsk, 23–25 октября 2018 года. – Ulyanovsk: Ульяновский государственный технический университет, 2018. – P. 96-101. – EDN REYSPU.
- [Misnik et al., 2019a] Misnik A., Krutalevich S., Prakapenka S. [et al.]. Impact Analysis of Additional Input Parameters on Neural Network Cryptocurrency Price Prediction // Proceedings - 2019 21st International Conference "Complex Systems: Control and Modeling Problems", CSCMP 2019, Samara, 03–06 сентября 2019 года. – Samara: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. – P. 163-167. – DOI: 10.1109/CSCMP45713.2019.8976486. – EDN VIKJCV.
- [Misnik et al., 2019b] Misnik A., Krutalevich S., Prakapenka S. [et al.]. Comparison of the predictions of convolutional neural networks with image arguments and long short-term memory neural networks with time-series arguments for cryptocurrency

- markets // CEUR Workshop Proceedings : IS 2019 - Proceedings of the 14th International Conference on Interactive Systems: Problems of Human-Computer Interaction, Ulyanovsk, 24–27 сентября 2019 года. Vol. 2475. – Ulyanovsk: Без издательства, 2019. – P. 214-222. – EDN RNCLVY.
- [**Галушкин, 2000**] Галушкин А.И. Теория нейронных сетей. Кн. 1. – М.: ИПРЖР. 2000. – 416 с.
- [**Мисник и др., 2019**] Мисник А.Е., Боровых П.А., Крутолевич С.К. [и др.]. Анализ изменения точности прогнозов нейронной сети, в зависимости от используемых входных параметров // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XXI Международной конференции. В 2-х т. Т. II. Самара, 03–06 сентября 2019 года / под редакцией С.А. Никитова, Д.Е. Быкова, С.Ю. Боровика, Ю.Э. Плешивцевой. – Самара: Общество с ограниченной ответственностью "Офорт", 2019. – С. 293-296. – EDN YIGKIP.
- [**Хайкин, 2006**] Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. – 2-е изд., испр. – М.: Ж ООО «И.Д. Вильямс», 2006. – 1104 с.
- [**Tang et al., 2015**] Tang, Jiliang; Chang, Shiyu; Aggarwal, Charu; Liu, Huan (2015). "Negative Link Prediction in Social Media" (PDF). In Proceedings of ACM International Conference on Web Search and Data Mining.