

УДК 621.791
DOI 10.17513/snt.40605

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА СВАРКИ ПОД ФЛЮСОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ПАРАМЕТРИЗАЦИИ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ

¹Жидков М.Е., ²Винныйчук В.А. ORCID ID 0009-0004-2764-7530,
²Подрезов Н.Н., ²Чернов А.В.

¹Филиал акционерного общества «АЭМ-технологии» «Атоммаш», Волгодонск,
Российская Федерация;

²Волгодонский инженерно-технический институт – филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ"», Волгодонск,
Российская Федерация, e-mail: vavinniichuk@mephi.ru

Для изготовления ответственных сварных изделий в атомной энергетике применяется автоматическая сварка под флюсом. Важная особенность этого способа электродуговой сварки плавящимся электродом – невозможность визуального наблюдения оператором-сварщиком за дуговым пространством из-за наличия насыпного слоя сварочного флюса. Из объективных средств контроля используются штатные приборы тока и напряжения. В обратных связях источника питания применяются датчики, обеспечивающие работу регуляторов по отработке возмущений и отклонений измеряемых параметров от назначенных режимов сварки, а также выработке управляющих воздействий в сварочный контур. При конвенциональной и программируемой автоматической сварке под флюсом есть недостаток информации о возможных нарушениях процесса, приводящих к дефектообразованию и снижению качества сварного соединения. В работе предложено применять автономную систему регистрации и мониторинга автоматической сварки под флюсом ответственных сварных соединений на базе преобразователя NI 9229. Функционал системы: регистрация данных по току и напряжению в форме эквидистантных временных рядов, хранение и передача данных в программно-аналитические приложения для обработки и визуализации результатов анализа данных. Целью данной работы является оценка устойчивости системы питания сварочной дуги с микропроцессорным источником ИОН 48 – 900 путем параметризации временных рядов по току и напряжению. По результатам обработки данных регистрации и мониторинга опытно-штатных сварок под флюсом сделан вывод об устойчивости изучаемой микропроцессорной системы питания сварочной дуги.

Ключевые слова: сварка под флюсом, система питания сварочной дуги, временные ряды, система регистрации и мониторинга, вольтамперная характеристика, параметризация

STUDY OF TECHNOLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE SUBSTRUCTED-ARC WELDING PROCESS USING TIME SERIES PARAMETERIZATION METHODS

¹Zhidkov M.E., ²Vinnichuk V.A. ORCID ID 0009-0004-2764-7530,
²Podrezov N.N., ²Chernov A.V.

¹Branch of the Joint-stock company “AEM-technologies” Atom mash, Volgograd, Russian Federation;

²Volgograd Institute of Engineering and Technology is a branch of the National Research Nuclear University “Moscow Institute of Engineering and Physics”, Volgograd, Russian Federation,
e-mail: vavinniichuk@mephi.ru

Submerged arc welding is used to manufacture critical welded products in the nuclear power industry. An important feature of this method of electric arc welding with a consumable electrode is the impossibility of visual observation by the operator – welder of the arc space due to the presence of a bulk layer of welding flux. Of the objective control means, standard current and voltage devices are used. In the feedback loops of the power source, sensors are used to ensure the operation of the regulators to process disturbances and deviations of the measured parameters from the designated welding modes, as well as to generate control actions in the welding circuit. In conventional and programmable automatic submerged arc welding, there is a lack of information about possible process violations that lead to defect formation and a decrease in the quality of the welded joint. The paper proposes to use an autonomous system for recording and monitoring automatic submerged arc welding of critical welded joints based on the NI 9229 converter. The system functionality: recording arrays of current and voltage data in the form of equidistant time series, storing and transmitting data to software and analytical applications for processing and visualizing the results of data analysis in the time and frequency domains. The aim of this work is to evaluate the stability of the welding arc power supply system with the ION 48 – 900 microprocessor source by parameterizing the time series of current and voltage. Based on the results of processing the registration and monitoring data of experimental and standard submerged arc welding, a conclusion was made about the stability of the studied microprocessor power supply system of the welding arc.

Keywords: submerged arc welding, welding arc power supply system, time series, recording and monitoring system, volt-ampere characteristic, parameterization

Введение

Одна из основных тенденций современного сварочного производства – повсеместный переход на цифровые программируемые системы питания сварочной дуги, которые являются необходимым элементом будущего интеллектуального производства сложнотехнической продукции в атомной энергетике [1-3]. В работе проведено исследование временных рядов (ВР) наблюдаемых параметров сварки (ток, напряжение), зарегистрированных в реальном времени автономной мониторинговой системой, применительно к автоматической сварке под флюсом (АСФ). Результаты анализа ВР применяются для назначения, корректировки, выявления нарушений технологических режимов сварки и диагностирования состояния дорогостоящего оборудования, особенно цифрового [4].

Цель исследования – оценка устойчивости системы питания сварочной дуги под флюсом с микропроцессорным источником ИОН 48-900 путем параметризации ВР по току и напряжению.

Материалы и методы исследования

Объект исследования – система питания сварочной дуги под флюсом, основным элементом которой является программируемый инверторный источник питания ИОН 48 – 900 фирмы «Донавтоматика». По схемному решению источник питания (ИП) является электрическим преобразователем и обеспечивает преобразование трехфазного переменного тока питающей сети в постоянный выходной выпрямленный ток с программируемыми параметрами режима АСФ. Как универсальный источник постоянного напряжения или тока ИОН 48-900 предназначен для работы в следующих режимах АСФ:

- конвенциональный (традиционные уставки по току и напряжению сварки);
- модулированный (знакоположительный импульсный или пульсирующий дугой);
- программируемый (задаваемые программно режимы по току и напряжению) [5].

Одной из основных характеристик сварочного источника питания для АСФ является его внешняя (выходная) статическая вольт-амперная характеристика (ВАХ) – функциональная зависимость, связывающая напряжение на выходных клеммах ИП с током нагрузки. Статическую ВАХ источника ИОН 48-900 для конвенционального режима получали путем непрерывных измерений представления в виде временных рядов выходных значений напряжения и тока на активной меняющейся резистивной на-

грузке от максимального значения, соответствующего напряжению холостого хода $U_{хх}$, до нулевого – току короткого замыкания $I_{кз}$. В качестве нагрузочного элемента применялся электронно управляемый охлаждаемый балластный реостат регистратора сварочных процессов «ИНЭМ-ЭКС-ПЕРТ» разработки ООО «Электронмаш – Систем» [6]. Отличительная особенность регистратора – это точное и ускоренное по быстрдействию (примерно в 10 раз) построение как одиночных, так и в целом семейства выходных ВАХ по сравнению с традиционными переключаемыми в ручном режиме балластными реостатами типа РБ – 302 и РБ – 306У2. Примеры практического применения регистратора и более подробное описание методики измерений статической ВАХ приведено в работе [7].

С целью исследования технологических характеристик АСФ выполнялись опытные наплавки на пластину толщиной 16 мм из стали 09Г2С в следующем конвенциональном режиме: ток постоянный обратной полярности, скорость подачи сварочной проволоки $V_{пп} = 110$ см/мин., что соответствовало заданию (уставке) тока дуги $I_d = 460$ А, уставка на режим нагрузки по напряжению сварки (на выходе ИП) $U_c = 36$ В. Сварочные материалы: электродная проволока Св – 09ХГНМТА-ВИ диаметром $\varnothing = 4$ мм, керамический флюс ФЦК – 16. Сварка АСФ проводилась на постоянной скорости подачи сварочной проволоки, что предполагает [8] использование системы АРДС – автоматического регулирования дуги саморегулированием. Запись временных рядов мгновенных значений АСФ на опытной пробе выполняли на том же автономном регистраторе на базе аналого-цифрового преобразователя (АЦП) NI 9229, что и при определении статической ВАХ. У дельта-сигма АЦП с разрядностью 24 бит есть четыре канала ввода данных на один общий таймер и параллельный режим их дискретизации, что обеспечивает вполне приемлемую точность и производительность – от 1,6 до 50 тысяч выборок (отсчетов) в секунду. Блок-схема процесса измерения и анализа данных представлена на рис. 1.

Параметризацию временных рядов по току и напряжению выполняли в дескриптивной (описательной) постановке задачи Data Mining [9]. В рамках сравнительного анализа массивов данных применялись методики классификации, кластеризации, поиск ассоциативных правил (взаимосвязи в выборках, закономерности, аномалии, паттерны), а также выявление отклонений, no value (нет значений), выбросов.

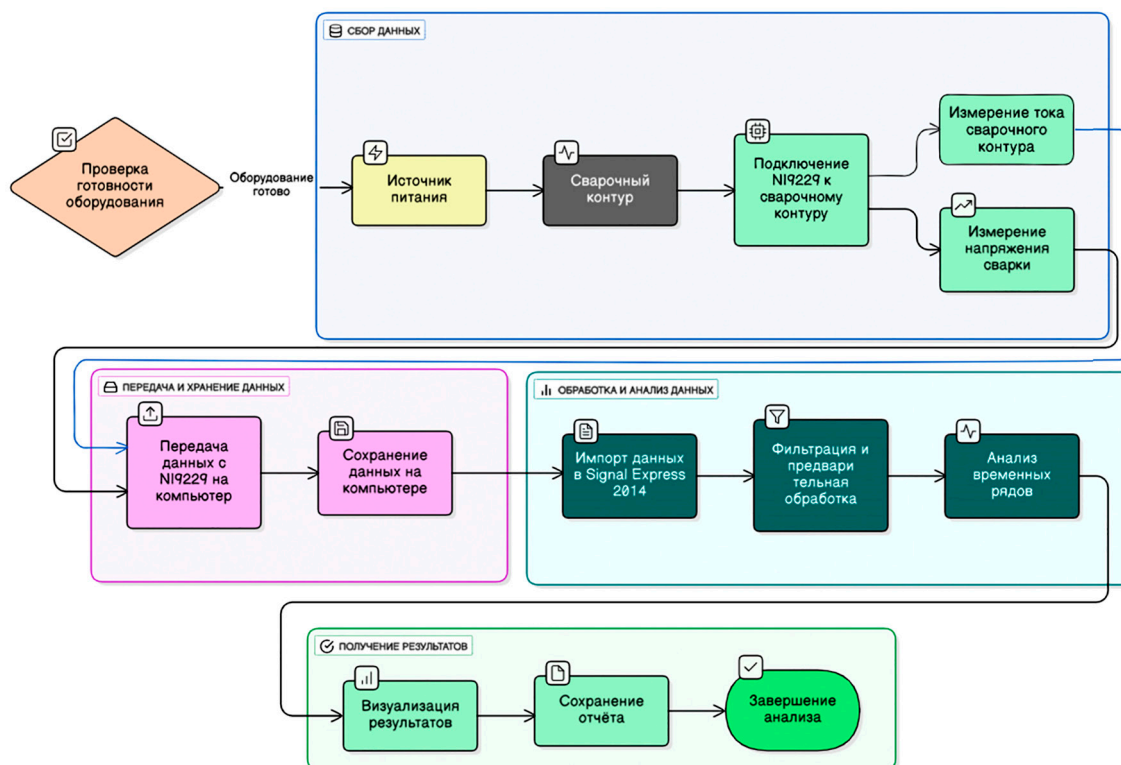


Рис. 1. Блок-схема процесса измерения и анализа данных
Источник: составлено авторами

Количественная оценка данных выполнялась с помощью системы показателей дескриптивной статистики:

- положение данных на числовой оси – минимум/максимум, выборочные средние, медиана, квартили, квантили;
- степень разброса данных относительно своего центра – среднее квадратическое отклонение, выборочные дисперсия, размах

выборки, коэффициент вариации, стандартное отклонение;

- формы распределения – выборочные коэффициент асимметрии, коэффициент эксцесса, положение выборочной медианы относительно выборочного среднего и др.

VBS – скрипты для определения статистических параметров временных рядов по току и напряжению:

```
'-- VBS script file
'-- Created on 11/06/2025 19:11:28
'-- Author: NI 9229
'-- Comment: Time Series Descriptor Statistics
```

```
Option Explicit 'Forces the explicit declaration of all the variables in a script.
Call ChnStatisticsChannelCalc("[14]/FilteredSignal I",60620408,0,0,0,0,0,"NameName")
'StatsSelection = eStatsRange + eStatsStandardDeviation + eStatsVariance + eStatsVariationCoefficient + eStatsThreeSigma + eStatsSixSigma + eStatsAverageAbsoluteDeviationFromMean + eStatsAverageAbsoluteDeviationFromMedian + eStatsSkewness + eStatsExcessKurtosis
StatsSelection = 60620408
StatsUsePopulationFormula = False
'----- Result Storage -----
StatsResultChn = False
StatsResultChnNames = False
StatsResultChnNameFormat = „NameName“
'----- Command -----
'Set ChnResult = ChnStatisticsChannelCalc("[14]/FilteredSignal I", 60620408, , , 0, 0, 0, "NameName")
```

ChnStatisticsChannelCalc (11/06/2025 19:12:10)

Input parameters

StatsSelection 60620408

StatsUsePopulationFormula No

StatsResultChn No

StatsResultChnNames No

StatsResultChnNameFormat NameName

Function result

Channel : [14]/FilteredSignal I

--- Extreme values ---

Minimum value: -0.700190

Maximum value: 463.435891

--- Mean values ---

Arithmetic mean: 334.451901

Root mean square: 355.503182

--- Quantiles ---

0.25 quantile (lower quartile): 259.245433

0.50 quantile (median): 369.210867

0.75 quantile (upper quartile): 445.256524

--- Dispersion dimensions ---

Range: 464.136081

Six sigma: 723.105287

Standard deviation: 120.517548

Three sigma: 361.452643

Variance: 14524.479325

Variation coefficient: 0.360343

--- Average absolute deviation ---

From mean: 99.331216

From median: 95.488343

--- Form dimensions ---

Skewness: -0.950620

Excess: -0.045218

Calculated the characteristic statistical values.

'-- VBS script file

'-- Created on 11/06/2025 19:31:55

'-- Author: NI 9229

'-- Comment: Time Series Descriptor Statistics

'-----

Option Explicit 'Forces the explicit declaration of all the variables in a script.

Call ChnStatisticsChannelCalc("[14]/FilteredSignal U",60620408,0,0,0,0,"NameName")

'StatsSelection = eStatsRange + eStatsStandardDeviation + eStatsVariance + eStatsVariationCoefficient + eStatsThreeSigma + eStatsSixSigma + eStatsAverageAbsoluteDeviationFromMean + eStatsAverageAbsoluteDeviationFromMedian + eStatsSkewness + eStatsExcessKurtosis

StatsSelection = 60620408

StatsUsePopulationFormula = False

'----- Result Storage -----

StatsResultChn = False

StatsResultChnNames = False

StatsResultChnNameFormat = „NameName“

'----- Command -----

'Set ChnResult = ChnStatisticsChannelCalc("[14]/FilteredSignal U", 60620408, , , 0, 0, 0, "NameName")

ChnStatisticsChannelCalc (11/06/2025 19:36:13)

Input parameters

StatsSelection 60620408

StatsUsePopulationFormula No

StatsResultChn No

StatsResultChnNames No

StatsResultChnNameFormat NameName

Function result

Channel : [14]/FilteredSignal U

--- Extreme values ---

Minimum value: 15.814608
 Maximum value: 57.146584
 --- Mean values ---
 Arithmetic mean: 35.181464
 Root mean square: 35.282470
 --- Quantiles ---
 0.25 quantile (lower quartile): 34.484366
 0.50 quantile (median): 35.453192
 0.75 quantile (upper quartile): 36.015105
 --- Dispersion dimensions ---
 Range: 41.264724
 Six sigma: 15.947008
 Standard deviation: 2.667835
 Three sigma: 7.973504
 Variance: 7.057342
 Variation coefficient: 0.075831
 --- Average absolute deviation ---
 From mean: 1.460028
 From median: 1.431904
 --- Form dimensions ---
 Skewness: 2.188425
 Excess: 20.210614
 Calculated the characteristic statistical values.

Сварочные сигналы и осциллограммы сильно зашумлены. Перед проведением анализа временные ряды в обязательном порядке необходимо подвергать предобработке:

- фильтрация или сглаживание – отсечение/выделение определенного диапазона частот или применение оконных усреднений выборки;
- сэмплирование или ресэмплирование – формирование или прореживание объема выборки;
- отсечение данных входа и выхода в сварку/из сварки.

Например, ресэмплирование применялось к данным, отфильтрованным фильтром низких частот (ФНЧ) с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ), по частоте отсечки верхней границы спектра 100 Гц. Максимальная частота дискретизации (fd) NI 9229, равная 25 кГц, в данном случае является избыточной и может быть снижена в десятки раз без потери значимой информации.

Алгоритм ресэмплирования, выполняемый для повторяемости в программном режиме, технически сводится к:

- нормализации спектра на весь диапазон частот на интервал [0,1], единице соответствует fd = 25 кГц;
- выбору и заданию новой частоты дискретизации по частоте Найквиста fn = 100 Гц с запасом, но не ниже fd = 200 Гц по теореме Котельникова – Найквиста – Шеннона;
- включению сглаживающего (anti – aliasing) фильтра с БИХ второго порядка с коррекцией начального смещения данных по времени;

- вычислению передискретизированных значений исходного временного ряда по алгоритму Akima субсплайновой интерполяции на основе кубических многочленов;

- записи повторной выборки (передискретизированных) данных в файл.

Результаты исследования и их обсуждение

Сварочные системы питания дуг требуют определения следующих свойств [10]:

- 1) статические характеристики ИП
 - внешняя статическая ВАХ;
 - пределы регулирования тока и напряжения;
 - напряжение холостого хода, ток короткого замыкания;
 - реакция на сетевые пульсации тока и напряжения;
- 2) технологические характеристики сварочного контура
 - стабильность переноса и формирования шва;
 - стабильность возбуждения и устойчивость горения дуги;

Результаты измерений внешней ВАХ ИП ИОН 48 – 900 представлены на рис. 2.

Внешняя ВАХ микропроцессорного ИП является комбинированной и состоит из следующих участков: холостого хода и подпитки поз. 1 для работы ИП на малых токах, жесткого поз. 2, обеспечивающего стабилизацию напряжения, который через небольшой переходный линейный поз. 3 соединяется со штыковым поз. 4, позволяющим работать ИП в режиме генератора тока. Фактически внешняя ВАХ после

участка 1 по форме является прямоугольной, что обеспечивает универсальность ИП. Напряжение холостого хода (U_{xx}) ИП составляет 62,5 В, ток короткого замыкания равен максимальному току нагрузки,

что способствует устойчивости АСФ. Аналогичные характеристики ВАХ получены и для других конвенциональных режимов нагружения источника активной нагрузкой [5, с. 84].

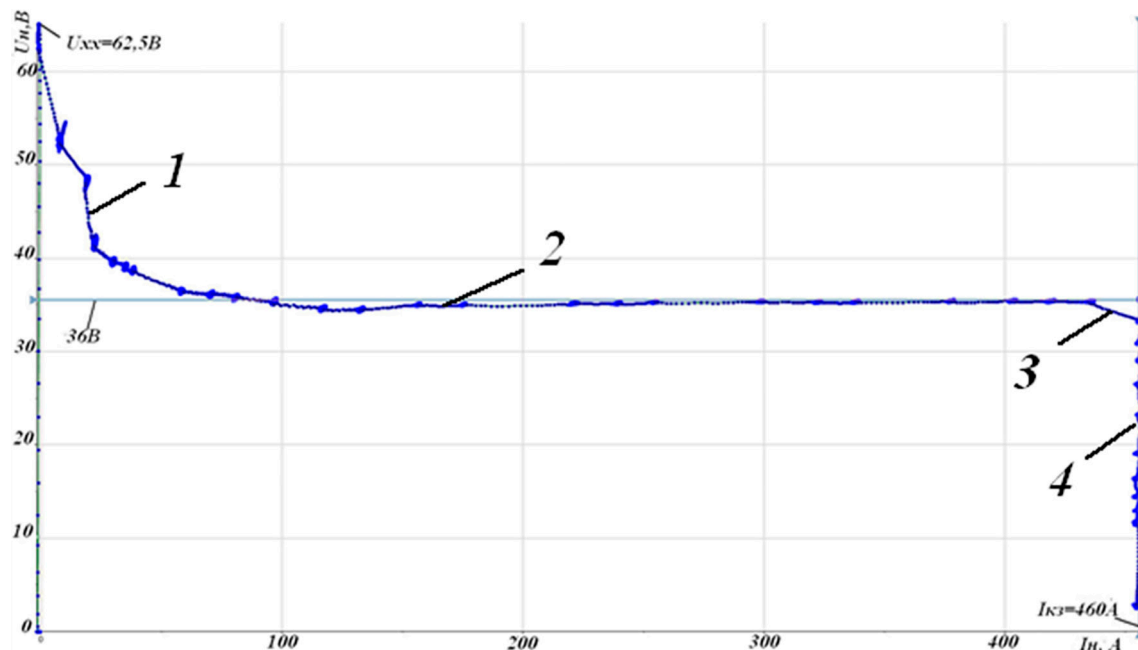


Рис. 2. Внешняя ВАХ источника питания, режим конвенциональный $U_n = 36В$, $I_n = 0 - 460А$; U_{xx} – напряжение холостого хода, $I_{кз}$ – ток короткого замыкания; 1 – участок подпитки; 2 – участок жесткой ВАХ; 3, 4 – переходный и штыковой участки
Источник: составлено авторами

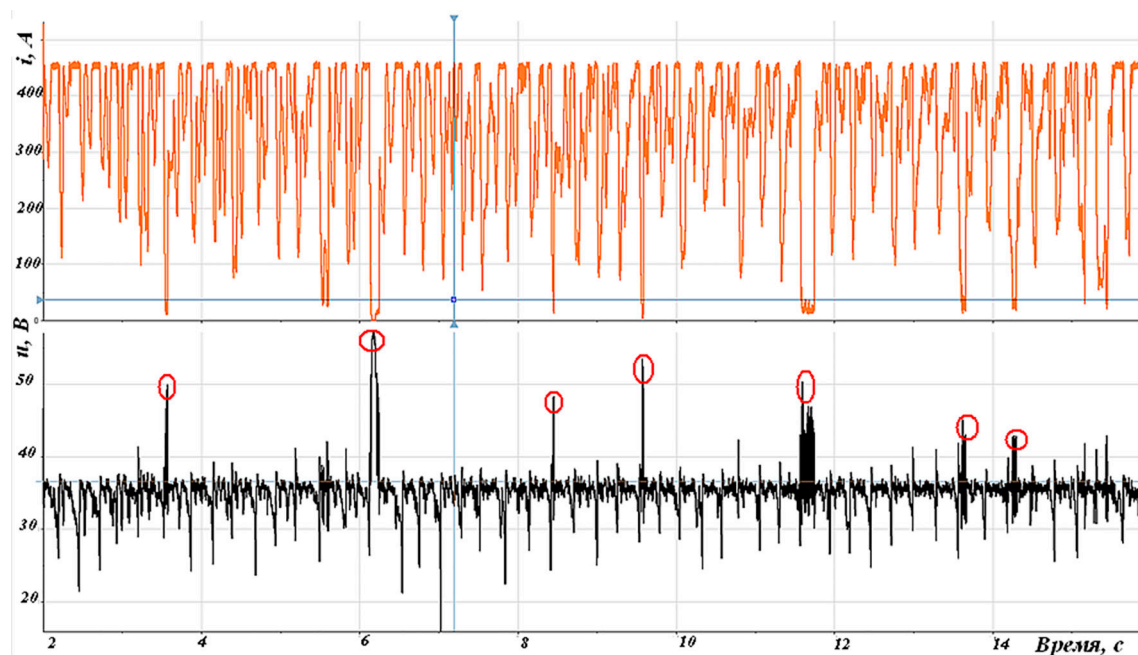


Рис. 3. Временные ряды мгновенных значений тока (i) и напряжения (u); конвенциональная АСФ, установка по максимальному току дуги $I = 460А$, напряжение сварки $U = 36В$; \bigcirc – кратковременные разрывы сварочной дуги
Источник: составлено авторами

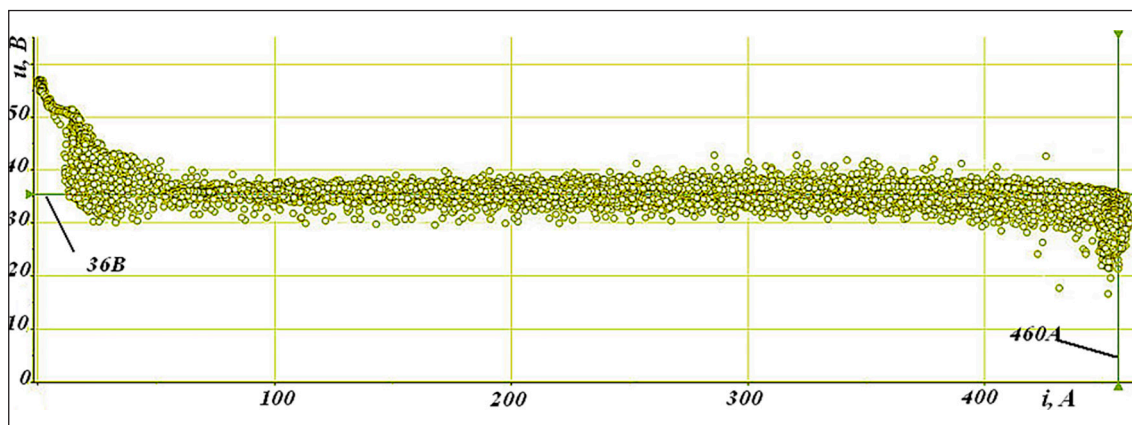


Рис. 4. Диаграмма рассеяния исследуемых временных рядов по мгновенным значениям тока (i) и напряжения (u)
Источник: составлено авторами

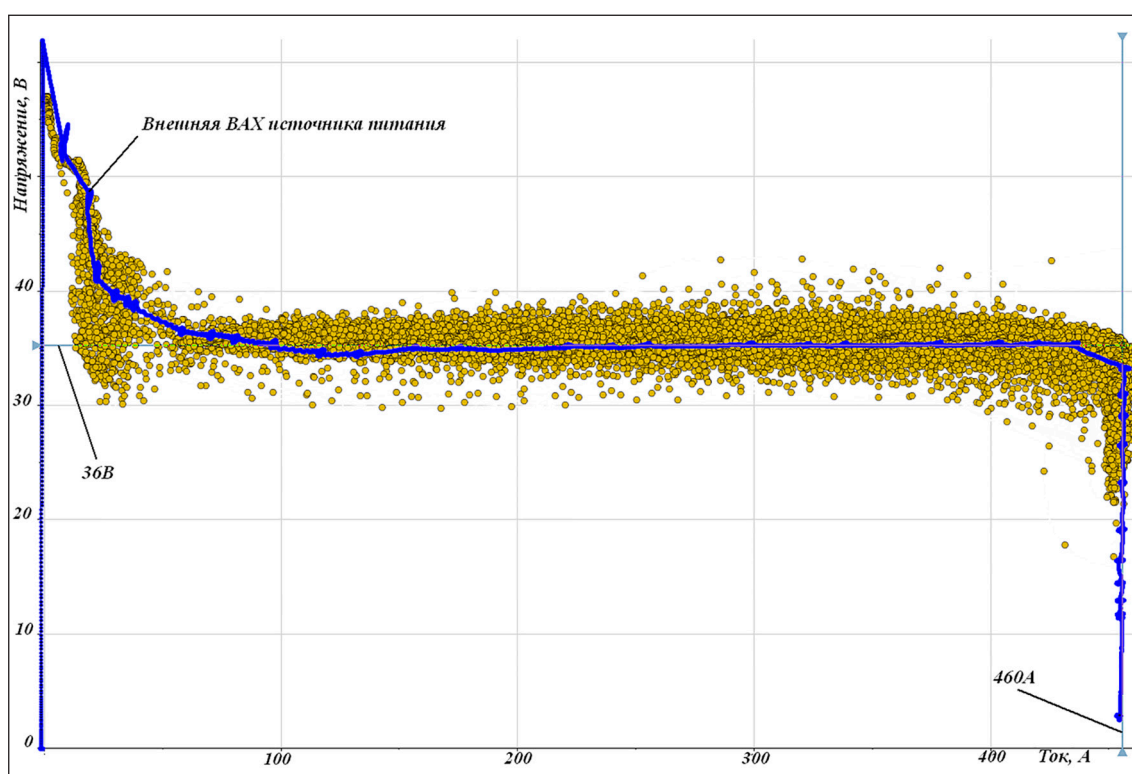


Рис. 5. Совмещенная синхронная диаграмма рассеяния исследуемых временных рядов и внешняя ВАХ ИП, режим конвенциональный
Источник: составлено авторами

Установлено, что семейство настраиваемых ВАХ находится в заявленном паспортными данными диапазоне регулирования по напряжению сварки 20,5–48 В, а активная мощность, снимаемая с выходных клемм ИП составляет 30...33 кВт [7].

На следующем этапе выполнялась конвенциональная АСФ на тех же уставках по току и напряжению, на которых опре-

делялась статическая ВАХ ИП (рис. 2). Результаты синхронной регистрации временных рядов мгновенных значений тока сварки и напряжения на выходных клеммах ИП после применения ФНЧ Баттерворта первого порядка с БИХ на частоту среза 100 Гц показаны на рис. 3. Кратковременные разрывы сварочной дуги были оперативно отработаны системой управления ИП.

Описательная статистика исследуемых реализаций

Статистические характеристики выборки	Ток, i , А	Напряжение, u , В
Значения min/max	-0,7/473,4	15,81/57,15
Среднее арифметическое (mean)	334,5	35,2
Действующее значение (RMS)	355,5	35,3
0,25 квантиля (нижний квартиль (LQ))	259,2	34,5
0,50 квантиля (медиана)	369,2	35,4
0,75 квантиля (верхний квартиль (UQ))	445,2	36,0
Интерквартильный размах (IQR)	186,0	1,5
Среднее абсолютное отклонение от среднеарифметического	99,3	1,46
Среднее абсолютное отклонение от медианы	95,4	1,43
Размах выборки (range)	474,1	41,3
Среднеквадратичное отклонение (standard deviation)	120,5	2,66
Дисперсия (variance) / коэффициент вариации (variation)	1,45E+04/0,36	7,06/0,075
Коэффициент асимметрии / коэффициент эксцесса (excess)	-0,95/-0,042	2,19/20,21
Тройное стандартное отклонение (3 сигма)	361,4	7,97
Шестикратное стандартное отклонение (6 сигма)	722,9	15,94

Источник: составлено авторами.

Для визуализации взаимосвязи между током и напряжением в процессе сварки была построена диаграмма рассеяния (scatter plot), на которой есть обособленные области (кластеры), соответствующие различным состояниям случайного процесса АСФ (рис. 4).

Для понимания диаграммы рассеяния совместим и синхронизируем данные рис. 2, 4. Из рис. 5 очевидно, что корреляционное поле рассеяний реализации процесса АСФ в виде временных рядов тока и напряжения сгруппировано на внешней ВАХ ИП.

При этом точки рассеяния располагаются по обе стороны неслучайной функции внешней ВАХ ИП, т.е. представляют собой как положительные, так и отрицательные отклонения процесса сварки от заданной микропроцессором ИП характеристики. Следовательно, мы имеем дело с центрированным случайным процессом (ЦСП), а поскольку каждый участок заданной ВАХ (рис. 2) можно выразить аналитически, то в целом вся комбинированная внешняя характеристика ИП является детерминированной функцией. Как известно [11], в ЦСП математическое ожидание детерминированной функции (неслучайной функции) равно самой этой функции. Это следует из определения математического ожидания случайного процесса: оно представляет собой неслучайную «среднюю функцию», вокруг которой группируются реализации процесса [12]. Отсюда следует, что внешняя ВАХ ИП является функциональным

математическим ожиданием для конвенционального режима АСФ. Так как в ВАХ есть участки (рис. 2) с постоянными заданными значениями по напряжению (жесткий) и току (штыковой), то для них применима дескрипторная (описательная) статистика, как для обычных случайных величин.

Описательная статистика по временным рядам мгновенных значений по току (i) и напряжению (u) дана в таблице. Мощность выборки 350 000 отсчетов за 12 секунд.

Из показателей положения данных на числовой оси определяли минимум/максимум, выборочное среднеарифметическое, квартили (медиана), квантили. Минимаксные значения находятся в допустимых пределах, выборочное среднеарифметическое по току на 13% процентов ниже уставки, а напряжения – на 3% ниже уставки. Это связано с изменениями тока дуги в процессе каплепереноса при плавлении электродной проволоки и низкой добротностью контура саморегулирования при АРДС. Ниже первого квартиля расположено 25% всех данных. Квартили делят вариационный ряд на четыре равные части. Между первым (LQ) и вторым квартилем также расположено 25% данных. Второй квартиль совпадает с медианой, медианы соответствующих вариационных рядов равны 369,2 А и 35,4 В. Разность между третьим (UQ) и первым (LQ) квартилями образует интерквартильный размах (IQR). По параметрам этой группы определяются выбросы – аномальные или экстремальные значения в выборках данных.

Разведочный анализ на выбросы проводился методом пятичисловой параметризации одномерных выборок по мгновенным току (i) и напряжению (u). К параметрам относятся медиана, нижний (LQ) и верхний (UQ) квартили, экстремумы i_L и i_U (по току) и u_L и u_U (по напряжению). Экстремумы определялись по стандартным зависимостям, после подстановки данных из таблицы:

$$i_L = \max\{i(1), LQ - 3/2 \cdot (IQR)\} = -19,8 \text{ A},$$

$$i_U = \min\{i(n), UQ + 3/2 \cdot (IQR)\} = 724,2 \text{ A}$$

$$u_L = \max\{u(1), LQ - 3/2 \cdot (IQR)\} = 31,75 \text{ В},$$

$$u_U = \min\{u(n), UQ + 3/2 \cdot (IQR)\} = 38,2 \text{ В}$$

Данные, выходящие за пределы экстремумов, считаются выбросами. Учитывая минимаксные значения, приведенные в таблице, в токовой выборке выбросов нет, а по напряжению есть – в интервалах 38,2 ... 57,15 В и 31,75...15,81 В.

Отбраковка выбросов выполняется по диаграмме рассеяния. Критерием отбраковки выбросов является их значительное отклонение от статической выходной ВАХ ИП, которую можно считать в данном случае общим паттерном диаграммы (рис. 5). Выбросы по напряжению 38,2...57,15 В отбраковке не подлежат, поскольку расположены в пределах управляемого сварочного ЦСП и связаны с отработкой системой управления ИП малых и средних возмущений, кратковременных разрывов сварочной дуги (рис. 3). Точки рассеяния по напряжению образуют устойчивый кластер на ВАХ ИП в интервале отклонений по току до уровня 50...15 А (рис. 4, 5), т.е. являются неотъемлемой частью ЦСП. Отбраковке подлежит выброс (рис. 3) по напряжению ниже 20 В – предела физического существования сварочной дуги под флюсом. Выброс кратковременный (точечный) не оказывает влияния на общую статистику, необходимости в его «нейтрализации» нет.

По второй группе показателей отметим высокую дисперсию по току, что также связано с процессами плавления в сварочном контуре, что подтверждает коэффициент вариации, который определяется как отношение стандартного отклонения к среднеарифметическому значению и равен 36%, что говорит о повышенной динамике сварочного процесса.

Анализ показателей формы распределений показал, что коэффициенты асимметрии и эксцесса отрицательны для тока и положительны по напряжению, при положительном коэффициенте асимметрии распределение сдвинуто в сторону меньших

значений (по напряжению), при отрицательном – в сторону больших (по току). Отрицательный коэффициент эксцесса по току указывает на «плосковершинное» распределение, а положительный по напряжению – на «островершинное» распределение.

Статистические методы также с успехом применяются как для анализа качества сварных соединений [13], наплавов [14], так и для системной координации сварки [15].

Заключение

В работе были зарегистрированы массивы первичных данных в виде временных рядов по току и напряжению в процессе снятия внешних ВАХ ИП ИОН 48-900 и автоматической сварки под флюсом опытных наплавов. Для этого применили автономную систему регистрации и мониторинга на базе преобразователя NI 9229. Параметризацию временных рядов проводили в дескриптивной постановке задачи Data Mining для анализа устойчивости микропроцессорной системы питания дуги в сварочном контуре. Установлено, что высокая динамика формоизменения сварочной дуги при сварке вызвана значительной нестабильностью тока дуги, что подтверждается данными по дисперсии тока, которая равна 14524 A^2 , и коэффициента вариации 36%, что значительно больше нормы в 10%. Связанные с этим разрывы дуги были кратковременными, порядка 20...50 мсек за счет оперативной отработки микропроцессорной системой управления ИП ИОН 48-900. В целом по результатам параметризации ВР подтверждена высокая устойчивость микропроцессорной системы питания сварочной дуги АСФ при сварке в конвенциональном режиме.

Список литературы

1. Wang B., Hu S.J., Sun L., Freiheit T. Intelligent welding system technologies: State-of-the-art review and perspectives // Journal of Manufacturing Systems. 2020. № 56. P. 373–391. DOI: 10.1016/J.JMSY.2020.06.020.
2. Szölösi J., et al. Cyber-physical systems for welding: components and implementation strategies. IET Cyber-Phys // Syst. Theory. 2024. Appl. 9 (4). P. 293–312. DOI: 10.1049/cps2.12092312.
3. Saini Anuj, Rehalia Vibhuti. Design and Assessment of Automatic Arc Welding Machine Based on Programming Logic Controller // International Journal of Engineering and Management Research. Vol. 14. Is. 6. 2024. P. 31-37. DOI: 10.31033/ijemr.14.6.31-37.
4. Kumar V., Parida M.K., Albert S.K. The state-of-the-art methodologies for quality analysis of arc welding process using weld data acquisition and analysis techniques // Int J Syst Assur Eng Manag. 2022. № 13. P. 34–56. DOI: 10.1007/s13198-021-01282-w.
5. Подрезов Н.Н., Винныйчук В.А., Томилин С.А. Анализ характеристик программируемого источника питания ИОН 48-900 для сварки под флюсом // Инновационные

перспективы Донбасса: материалы 10-й Международной научно-практической конференции, Донецк, 28–30 мая 2024 года. Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2024. С. 82–85. EDN: XDOPUP.

6. Сас А.В., Островский М.А. Регистрация характеристик инверторных источников питания // Глобальная ядерная безопасность. 2016. № 2 (19). С. 29–32.

7. Винныйчук В.А., Подрезов Н.Н., Доронин Ю.В. Оперативное определение вольтамперных характеристик сварочных источников питания в атомном машиностроении // Глобальная ядерная безопасность. 2023. № 4 (49). С. 22–26.

8. Милютин В.С. Испытания сварочных свойств оборудования для дуговой сварки. Екатеринбург, 2019. 466 с. URL: <https://elar.urfu.ru/handle/10995/71955> (дата обращения: 08.09.2025).

9. Han Jiawei, Pei Jian, Tong Hanghang. Data Mining: Concepts and Techniques. 4th Edition. Morgan Kaufmann, 2023. 752 с. ISBN: 978-0-12-811760-6.

10. Чернов А.В. Обработка информации в системах контроля и управления сварочным производством: монография. Новочеркасск: НГТУ, 1995. 180 с. ISBN: 5-88998-004-1.

11. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения: учеб. пособие для вузов. 2-е изд., стер. М.: Высш. шк., 2000. 383 с. ISBN: 978-5-406-03549-8.

12. Корнева И.П. Случайные процессы и математическая статистика. Калининград: Издательство БГАРФ, 2021. 72 с. ISBN: 978-5-7481-0479-1.

13. Oladebey D.H., Adejuyigbe S.B., Kareem B. Statistical Analyses of the Effects of Welding Processes on Load, Extension and Hardness Properties of Welded Mild Steel Plates // Journal of Mechanics Engineering and Automation. 2020. № 10 (3). P. 72–83. DOI: 10.17265/2159-5275/2020.03.001.

14. Krishna Sampath. Selective Analysis of a High-Strength Steel Shielded Metal Arc Weld Metal Database // Aspects in Mining and Mineral Science. 2024. № 12 (4). P. 1483–1490. DOI: 10.31031/AMMS.2024.12.000795.

15. Haievskiy O., Kvasnytskyi V., Haievskiy V., Zvorykin C. Analysis of the influence of the systemic welding coordination on the quality level of joints // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. № 5/1 (107). С. 98–109. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.204364.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.