

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАНДОМИЗАЦИИ ПРИ АНАЛИЗЕ МНОГОВАРИАНТНЫХ СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ

© 2018 В.В. Кривин, В.А. Толстов, И.О. Ишигов

Волгодонский инженерно-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, Волгодонск, Россия

В статье описывается метод определения идентификационных характеристик процесса сварки на основе анализа фазового портрета. Показано, что процесс подвержен множеству возмущающих факторов: устранимых и неустранимых. Проанализированы возможности применения известных статистических методов оценки для идентификации такого процесса. Описан алгоритм получения фазового портрета, его разбиение на состояния и оценку идентификационных характеристик каждого состояния.

Ключевые слова: сварка, фазовый портрет, идентификация состояния процесса, робастные методы.

Поступила в редакцию: 14.06.2018

Большая часть процессов, связанных с изготовлением и эксплуатацией различных изделий машиностроения, приборостроения и других отраслей промышленности, определяется некоторым набором случайных параметров, характеризующих эти процессы, измерять которые непосредственно и/или в полной мере либо сложно, либо не представляется возможным. Однако часто возникает ситуация, когда указанные параметры, в свою очередь, стохастически связаны с некоторым набором случайных величин, реализации которых поддаются измерению. Поэтому естественно попытаться оценить величины параметров непосредственно влияющих на качество рассматриваемых процессов, увязав эти оценки с законами изменения, опосредовано влияющих на качество процессов измеряемых случайных факторов.

Общие теоретические принципы, устанавливающие связь, между случайными характеристиками различного уровня влияния на контролируемый процесс, определяются достаточно просто. Если $f(\bar{x}, \bar{\theta})$ – плотность вероятности измеряемой l -мерной случайной величины \bar{x} , зависящей от m -мерной случайной величины $\bar{\theta} = (\theta_1, \dots, \theta_m)$. Непосредственные измерения последней невозможны, причем $\bar{\theta}$ имеет плотность вероятности $\alpha(\bar{\theta})$. Тогда рассмотрим функцию следующего вида:

$$\omega(\bar{x}) = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} f(\bar{x}, \bar{\theta}) \alpha(\bar{\theta}) d\theta_1 \dots d\theta_m, \quad (1)$$

Функция (1) является смесью распределений $f(\bar{x}, \bar{\theta})$ и $\alpha(\bar{\theta})$, и определит безусловную плотность вероятности случайных характеристик \bar{x} контролируемого процесса [1].

Получение и использование функции $\omega(\bar{x})$ в общем случае для определения количественных, а не качественных, характеристик конкретного анализируемого процесса является трудновыполнимой задачей. Однако часто возникает ситуация, когда случайная величина $\bar{\theta}$ является дискретной случайной величиной, имеющей следующий ряд распределения:

$\bar{\theta}$	$\bar{\theta}_1$...	$\bar{\theta}_n$
p	p_1	...	p_n

В этом случае равенство (1) можно переписать в следующем виде:

$$\omega(\bar{x}) = \sum_{i=1}^n p_i f(\bar{x}, \bar{\theta}_i) \quad (2)$$

Такое представление плотности вероятности $\omega(\bar{x})$ указывает на то, что его использование возможно тогда, когда на контролируемый процесс влияет конечное число доминирующих в разное время факторов, а сам процесс может быть разбит естественным образом на конечное число различных состояний. С подобной ситуацией приходится сталкиваться в различных областях: при анализе сварочных процессов, при оценке эксплуатационной надежности интеллектуальных датчиков и в ряде других случаев [2].

Укажем способы проведения оценок величин неизвестных характеристик – вероятностей p_i , а также неизвестных параметров, характеризующих дифференциальные функции распределения $f(\bar{x}, \bar{\theta}_i)$ в предположении, что вид этих функций априори известен.

1) Алгебраический способ. Этот способ предполагает либо непосредственное вычисление параметров плотности вероятности $f(x, \theta_i)$, либо их косвенное вычисление, посредством составления систем уравнений, связывающих искомые величины [3]. Использование этого метода и в первом и во втором случае требует предварительной сортировки (кластеризации) измеренных данных, что не всегда представляется возможным. Причиной этого является то, что множества измеренных случайных параметров, характеризующих различные состояния случайного процесса, чаще всего имеют непустое пересечение, поэтому невозможно решить вопрос о том, к какому состоянию процесса отнести измеренное значение параметра, лежащее в указанном пересечении множеств.

Учитывая сказанное, алгебраический способ определения параметров целесообразно использовать для первичной грубой оценки искомых параметров с последующим их уточнением при использовании других методов.

2) Метод сравнения вероятностей, состоящий в аппроксимации функции $\omega(\bar{x})$ сравнением ее значений с соответствующими значениями, полученными по гистограмме [4]. Достоинством этого метода является то, что при его применении предварительной кластеризации статистических данных не требуется. Основными проблемами, возникающими при использовании этого метода, являются выбор метрики при построении целевых функций для указанной аппроксимации функции $\omega(\bar{x})$ и «эффект оврагов», возникающий при оптимизации полученных целевых функций.

3) Метод наибольшего правдоподобия [4]. Достоинствами этого метода являются, во-первых, устранение необходимости кластеризации статистических значений, во-вторых, при его использовании исчезает необходимость выбора метрики при построении целевой функции (функции правдоподобия). Недостаток этого метода, как и предыдущего, состоит в том, что он приводит к необходимости оптимизации целевых функций, обладающих сильно выраженным «эффектом оврагов».

Отметим, что наиболее эффективным является использование комбинированного метода. На первом этапе используют алгебраический метод, а затем полученные на его основе результаты уточняют либо методом наибольшего правдоподобия, либо методом аппроксимации [5].

В качестве примера использования описанных методов рассмотрим задачу идентификации процесса дуговой сварки плавлением. На формирование сварного соединения при дуговой сварке влияют различные возмущающие воздействия как связанные, так и не связанные со сварочным процессом. В первом случае это коробление и деформация сварного соединения: раскрытие или захлопывание зазора в стыке, выпучивание поверхности и т.д. Во втором – нестабильность работы сварщика,

сварочного оборудования и разброс в свойствах сварочных материалов. В большинстве случаев данные возмущения относятся к неконтролируемым, поэтому их невозможно учесть при построении теоретических моделей и весьма затруднительно в экспериментальных. Для большинства известных методов построения моделей сварочных процессов этот факт не позволяет ограничиться линейными зависимостями [6]. Определение параметров нелинейных многопараметрических моделей – коэффициентов регрессионной зависимости – крайне затруднительно, что фактически исключает их широкое применение.

В связи с этим, проблема оценки показателей качества сварного соединения по текущим значениям контролируемых параметров на основе модели процесса, остается нерешенной актуальной задачей современного сварочного производства. Решение проблемы уменьшения влияния возмущающих воздействий связано с организацией промышленного эксперимента, разработкой формальных методов получения данных о процессе и классификации процесса на множестве идентификационных данных.

Особенностью процесса сварки плавлением является то, что надежное и оперативное измерение возможно только для мгновенных значений тока и напряжения сварки. Остальные параметры могут быть получены только при исследовании готового шва и подвержены необъективности, т.к. содержат элементы экспертных оценок [7]. Это приводит к необходимости максимально полного использования имеющейся информации, т.е. к потребности в алгоритмах выделения информативных идентификационных характеристик из массивов значений измеренных параметров.

Удобным средством наглядного представления процесса являются фазовые портреты [8]. Они представляют собой двумерные гистограммы, различной яркостью отображающие плотность точек траектории процесса в различных областях фазового пространства в разрезе каких-либо двух параметров процесса. Их рассмотрение показывает принципиальную неоднородность фазового пространства сварочного процесса. Это позволяет считать различные меры неоднородности фазового портрета существенной идентификационной характеристикой процесса.

Идея предлагаемого метода получения идентификационных характеристик процесса сварки плавлением строится на двух положениях:

- отождествление топологической неоднородности на гистограмме совместного распределения тока сварки и напряжения на дуге с пиками функции распределения;
- разделение их по гиперплоскостям водоразделов.

Эмпирическая функция распределения оценивается по фазовому портрету процесса – многомерной гистограмме, полученной по измеренным значениям параметров. На рисунке 1 представлена такая многомерная гистограмма. Она является изображением совместной плотности распределения мгновенных значений тока и напряжения и выполнена в равномерном масштабе. Разной яркостью отображено количество точек, попавших в данную область (темнее – больше). При визуальном анализе вольтамперных характеристик процесса определяются четко разделенные группы точек. Эксперты-технологи идентифицируют, по крайней мере, некоторые из этих групп как известные состояния процесса (капельный перенос металла, угасание дуги и горение дуги и т.п.). Очевидно, наличие и характеристики этих состояний являются важной технологической информацией, игнорирование которой на этапе классификации процесса и принятии решения может привести к необъективности конечного результата такой классификации или к недостаточной обоснованности принятого решения [9]. Причём неважно, принимает решение эксперт или компьютерная программа обработки знаний.

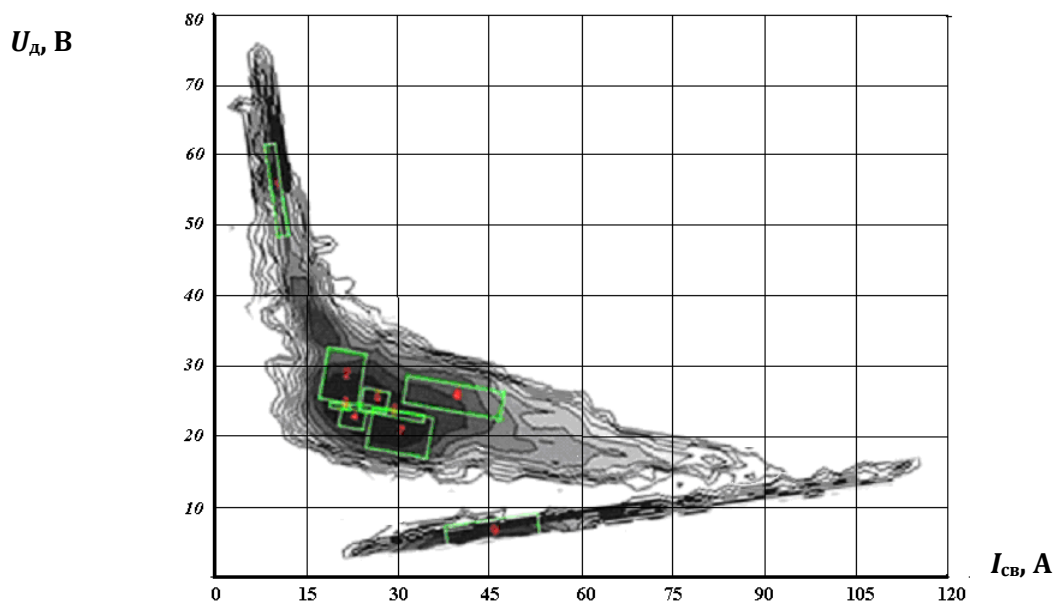


Рисунок 1 – График совместной плотности распределения тока и напряжения в равномерном масштабе [Diagram of the joint current and voltage distribution density in uniform scale]

После разделения данных по кластерам функция распределения внутри каждого кластера имеет единственный пик, т.е. является одномодовой. На таких данных стандартные статистические методы дают устойчивые результаты, то есть являются робастными. Это позволяет использовать эти методы для получения адекватных идентификационных характеристик. В качестве таких характеристик используются математические ожидания и среднеквадратические отклонения, хотя можно использовать и другие выборочные статистики.

Результатом применения метода является таблица, содержащая для всех выделенных кластеров статистические характеристики всех перечисленных параметров. В качестве характеристик выбраны средние и среднеквадратичные отклонения значений параметров (ток сварки и напряжение на дуге), длительности (t) и доля ($t_{\%}$) пребывания в состоянии, и паузы между возвратами в состояние (скважность $t_{СКВ}$) [9]. Оценки данных характеристик для рассматриваемой гистограммы приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Статистические характеристики кластеров гистограммы [Statistical characteristics of histogram clusters]

№	$t_{\%}$	$t_{СКВ}$		t		U		I	
		М	σ	М	σ	М	σ	М	σ
1	11	8,83	17,57	8,83	17,57	123,21	17,57	0,52	0,70
2	16	1,43	9,75	1,43	9,75	47,89	9,75	8,44	2,63
3	4	0,47	0,92	0,47	0,92	36,76	0,92	8,83	1,45
4	10	0,55	3,47	0,55	3,47	32,77	3,47	10,78	1,81
5	15	0,70	3,77	0,70	3,77	41,34	3,77	13,39	1,76
6	11	0,57	1,23	0,57	1,23	37,66	1,23	16,09	4,61
7	19	0,99	7,59	0,99	7,59	30,55	7,59	17,74	4,37
8	5	1,71	4,87	1,71	4,87	47,10	4,87	24,59	6,92
9	9	3,02	5,14	3,02	5,14	2,32	5,14	30,29	6,71

Содержимое этой таблицы и является идентификационными характеристиками, несущими информацию о существенных состояниях сварочного процесса. В частности, данные идентификационные характеристики использованы для проверки адекватности модели звука сварочного процесса [10]. Результаты экспериментов со звуковым сопровождением процесса сварки позволяют утверждать, что оценка идентификационных характеристик по предложенной методике может быть применена при построении моделей сложных случайных процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бендат, Дж. Прикладной анализ случайных данных: пер. с англ. [Текст] / Дж. Бендат, А. Пирсол. – Москва : Мир, 1989. – 540 с.
2. Хрущева, И.В. Основы математической статистики и теории случайных процессов [Электронный ресурс] : учеб. пособие / И.В. Хрущева, В.И. Щербаков, Д.С. Леванова. – Электрон. дан. – Санкт-Петербург : Лань, 2009. – 336 с. – URL: <https://e.lanbook.com/book/426>.
3. Хампель, Ф. Робастность в статистике. Подход на основе функций влияния [Текст] / Ф. Хампель, Э. Рончетти, П. Рауссеу, В. Штаэль – Москва : Мир, 1989 – 512 с.
4. Туганбаев, А.А. Теория вероятностей и математическая статистика [Электронный ресурс] : учеб. пособие / А.А. Туганбаев, В.Г. Крупин. – Электрон. дан. – Санкт-Петербург : Лань, 2011. – 320 с. – URL: <https://e.lanbook.com/book/652>.
5. Кривин, В.В. Метод идентификации хаотических процессов с аддитивной стохастической составляющей [Текст] / В.В. Кривин, М.Ю. Виниченко // Вестник Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ». – 2013. – Т. 2, № 1. – С. 63-70.
6. Компьютерный тренажер для обучения навыкам сварки при изготовлении и монтаже конструкций энергетического машиностроения. Отчет о НИОКР (промежуточ.) : 50.41.25 / НИЯУ МИФИ ; рук. А.А. Тямалов ; исполн. : В.В. Кривин [и др.] – Волгоград, 2014. – 176 с. № ГР 114102740077. – Инв. № 08.03-08.01-01.
7. Кривин, В.В. Оценка аддитивной стохастической составляющей сигналов процесса сварки плавлением [Текст] / В.В. Кривин // Изв. вузов Сев.-Кавк. регион. Электромеханика. 2003. – № 3. – С. 64-66.
8. Рюэль, Д. Случайность и хаос [Электронный ресурс] / Давид Рюэль. – Электрон. текстовые данные. – Москва, Ижевск : Регулярная и хаотическая динамика, 2001. – 191 с. URL: <http://www.iprbookshop.ru/16627.html>.
9. Кривин, В.В. Методы автоматизации ограниченно детерминированных процессов: Монография [Текст] / В. В. Кривин ; М-во образования Рос. федерации. Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (Новочеркас. политехн. ин-т). – Новочеркасск : Ред. журн. Известия вузов. Электромеханика, 2003 (ЦОП ЮРГТУ (НПИ)). – 173 с.
10. Кривин, В.В. Проверка адекватности модели звука ручной дуговой сварки / В.В. Кривин [и др.] // Глобальная ядерная безопасность. – 2012. – № 2-3(4). – С. 32-38.

REFERENCES

- [1] Bendat J., Pirsol A. Prikladnoi analiz sluchainykh dannykh [The Applied Analysis of Random Data]. Moscow. Mir. 1989. 540 p. (in Russian).
- [2] Hrusheva I.V., Scherbakov V.I., Levanova D.S. Osnovy matematicheskoi statistiki i teorii sluchainykh processov [The Basis of Mathematical Statistics and Theory of Random Processes]. St. Petersburg. Lan'. 2009. 336 p. Available at: <https://e.lanbook.com/book/426> (in Russian).
- [3] Hampel' F., Ronchetti E., Rausseu P. et al. Robastnost' v statistike. Podhod na osnove funktsii vlianiia [The Robust in Statistics. The Approach Based on Influence Functions]. Moscow. Mir. 1989. 512 p. (in Russian).
- [4] Tuganbaev A.A., Krupnin V.G. Teoriia veroiatnosti i matematicheskaiia statistika [The Theory of Probability and Mathematical Statistics]. St. Petersburg. Lan'. 2011. 320 p. Available at: <https://e.lanbook.com/book/652> (in Russian).
- [5] Krivin V.V., Vinichenko M.Y. Metod identifikacii haoticheskikh processov s additivnoi sostavliauschei [The Method for Identifying the Chaotic Processes with Additive Component]. Moscow. Vestnik natsionalnogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta «MIFI» [Bulletin of the National Research Nuclear University "MEPhI"]. 2013. V. 2. № 1. P. 63-70 (in Russian).
- [6] Kompiuternii trenazhor dlia obucheniiia navykam ruchnoi dugovoi svarki pri izgotovlenii i montazhe konstrukcii energrticheskogo mashinostroenia. Otchet o NIOKP [The Computer Training System for Manual Arc Welding Skills Used in Energetic Machine Production and Mounting. The Interim Report about Scientific Investigation and Empirical Construction]. Grant number: 114102740077. MIFI. Volgondsk. 2014. 176 p. (in Russian).
- [7] Krivin V.V. Ocenka additivnoi stohasticheskoi sostavliauschei signalov processa svarki plavleniem [The Estimation of Additive Stochastic Component in Signals of Fusion Welding Process]. Izvestiia vuzov Severo-Kavkazskii region [Bulletin of Highest School in North Caucasus]. Elektromehaniка [Electro Mechanics]. 2003. № 3, P. 64-66 (in Russian).
- [8] Riuel D. Sluchainost' i haos [Coincidence and Chaos]. Moscow, Izhevsk. Reguliarnaii i haoticheskaiia dinamika [The Regular and Chaotic Dynamics]. 2001. 191 p. Available at: <http://www.iprbookshop.ru/16627.html> (in Russian).
- [9] Krivin V.V. Metody avtomatizacii ogranichenno determinirovannykh processov. Monografia [The

- Automation Methods of Boundedly Deterministic Processes. Monograph]. South-Russian State Technical University. Novocherkassk. Izvestiia vuzov Severo-Kavkazskii region [Bulletin of Highest School in North Caucasus]. Elektromekhanika [Electro Mechanics]. 2003. 173 p. (in Russian).
- [10] Krivin V.V. et al. Proverka adekvatnosti modeli zvuka ruchnoi dugovoi svarki [The Adequacy Check for Model of Manual Arc Welding Sound]. Global'naia Iadernaia Bezobasnost' [Global Nuclear Safety]. 2012. № 2-3 (4). P. 32-38 (in Russian).

The Estimation of Randomization Parameters in the Analysis of Multivariate Random Processes

V.V. Krivin¹, V.A. Tolstov², I.O. Ishigov³

*Volgodonsk Engineering-Technical Institute – Branch of NRNU «MEPhI»,
Lenina street, 73/94, Volgodonsk, Russia 347360*

¹ *ORCID iD: 0000-0003-0903-0786*

WoS Researcher ID: E-2267-2018

e-mail: vvkrivin@mephi.ru

² *ORCID iD: 0000-0001-7144-5195*

WoS Researcher ID: F-1032-2017

e-mail: v-tolstov-2017@mail.ru

³ *ORCID iD: 0000-0002-5829-6989*

WoS Researcher ID: E-2448-2018

e-mail: ioishigov@mephi.ru

Abstract – The article deals with method to characterize the identification of the state of the welding process based on phase portrait analysis. It is shown the various both recoverable and non-recoverable factors influence that process. The abilities of well-known statistical methods to identify such process were being analyzed. The article describes the algorithm to mine the phase portrait, its spleeting to states and estimation of identifying characteristics for each state.

Keywords: welding, phase portrait, identification of process state, robust methods.