

УДК 51-74

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОРРОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ОТРАСЛИ

Корчагин С.А.

*ФГБОУ ВО «Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации»,
Москва, e-mail: SAKorchagin@fa.ru*

Проведено математическое и компьютерное моделирование коррозионных процессов на примере объектов железнодорожной отрасли. На основе результатов моделирования предложен метод, позволяющий увеличить эффективность активных методов коррозионной защиты. Установлены параметры вычислительного эксперимента для построения фазовых траекторий. Приведены методика и техническое решение по выбору эффективных параметров сигнала для подавления коррозионных процессов. Реализован метод возвратных карт, разработан алгоритм для проведения и обработки потока данных, включая многоканальные записи. Приведены экспериментальные результаты и результаты моделирования динамики коррозионных процессов металлов на примере объектов железнодорожной отрасли. Установлено, что процесс коррозии может быть подавлен путем наложения на систему специально подобранных параметров, при которых аттрактор системы обращается в точку. Имеется возможность отличить детерминированный хаос от стохастического процесса. Разработан программный комплекс, позволяющий рассчитывать эффективные параметры импульса напряжения для подавления хаоса коррозионных процессов металла. Результаты будут полезны специалистам железнодорожной отрасли, IT-специалистам, исследователям в области электрохимии, математического и компьютерного моделирования, а также инженерам и разработчикам при создании прикладных решений по борьбе с коррозией металла.

Ключевые слова: математическое моделирование, коррозия, метод активной защиты, нелинейная динамика, программный комплекс

MODELING OF CORROSION PROCESSES FOR INVESTIGATION OF OBJECTS OF THE RAILWAY INDUSTRY

Korchagin S.A.

*Financial University under the Government of the Russian Federation,
Moscow, e-mail: SAKorchagin@fa.ru*

Mathematical and computer modeling of corrosion processes has been carried out on the example of railway industry facilities. Based on the simulation results, a method is proposed that makes it possible to increase the efficiency of active methods of corrosion protection. The parameters of the computational experiment for constructing phase trajectories are established. A technique and technical solution for choosing effective signal parameters for suppressing corrosion processes are presented. The method of return maps has been implemented, an algorithm has been developed for conducting and processing a data stream, including multichannel recordings. Experimental results and results of simulation of the dynamics of corrosion processes in metals are presented on the example of railway industry facilities. It has been established that the corrosion process can be suppressed by imposing specially selected parameters on the system, at which the attractor of the system turns into a point. It is possible to distinguish deterministic chaos from a stochastic process. A software package has been developed that makes it possible to calculate the effective parameters of a voltage pulse to suppress the chaos of metal corrosion processes. The results will be useful for railway industry specialists, IT specialists, researchers in the field of electrochemistry, mathematical and computer modeling, as well as engineers and developers in creating applied solutions to combat metal corrosion.

Keywords: mathematical modeling, corrosion, active protection method, nonlinear dynamics, software package

Проблемы, связанные с коррозией металла, являются одной из ключевых экономических и технических задач современности [1, 2]. Ряд отраслей, а в некоторых случаях даже экономики целых государств страдают из-за проблем, связанных с коррозией металла [3, 4]. Авторы работ [5, 6] указывают отрасли, в которых коррозионные задачи являются особо острыми. Среди таких отраслей особым образом выделяются промышленность, строительство и железнодорожная отрасль [7]. На железной дороге находится большое количество объектов инфраструктуры, подверженной коррозионным процессам. Крупные

компании теряют миллиарды долларов из-за ущерба, связанного с коррозией металла. Проблемам предотвращения хаоса в процессах коррозии металлов посвящены работы [8, 9]. Тем не менее на сегодняшний день наблюдается острая нехватка прикладных разработок и практического применения теоретических аспектов коррозионной защиты, где фундаментальные исследования в довольно высокой мере опередили техническое применение [10]. Анализ вектора развития активных методов борьбы с коррозией металлов показывает, что одним из перспективных и экономически целесообразных путей борьбы с кор-

розией является применение современных информационных технологий, включая набор датчиков, АЦП/ЦАП-преобразователи, современные программные комплексы, основанные на эффективном использовании математических моделей и методов машинного обучения. Таким образом, разработка прикладных инструментов, направленных на решение коррозионных проблем, в частности на железнодорожном транспорте, является актуальной задачей.

Цель исследования заключается в разработке математических и компьютерных моделей, позволяющих исследовать коррозионные процессы металлов на объектах железнодорожной отрасли.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования являются металлические конструкции, подверженные процессам коррозии, например объекты железнодорожной инфраструктуры. В качестве примера рассмотрена арматура пешеходного моста, проходящего над железнодорожными путями (рис. 1). Для моделирования

коррозионных процессов рассмотрим металлическую пластину, помещенную в водный раствор.

На рис. 2 изображена схема процесса коррозии. В схеме используются следующие обозначения: M_O – пленка оксида, M_{OH} – пленка гидроксида, M_{OHp} – растворенный гидроксид, M_A – соль.

Для описания математической модели рассмотрим процесс электрохимической коррозии, при котором образуется пленка оксида металла и пленка гидроксида металла. Состояние системы можно описать с помощью положения точки в трехмерном фазовом пространстве $\mu_0 - \mu_{OH} - K_M$ [11], где μ_0 – доля поверхности, покрытая оксидом металла, μ_{OH} – доля поверхности, покрытая гидроксидом металла, K_M – концентрация ионов металла в растворе. Для того чтобы рассчитать скорость изменения каждого из параметров, необходимо решить соответствующие кинетические уравнения и на основании полученных данных построить фазовые траектории движения фигуративной точки.



Рис. 1. Образец арматуры пешеходного моста

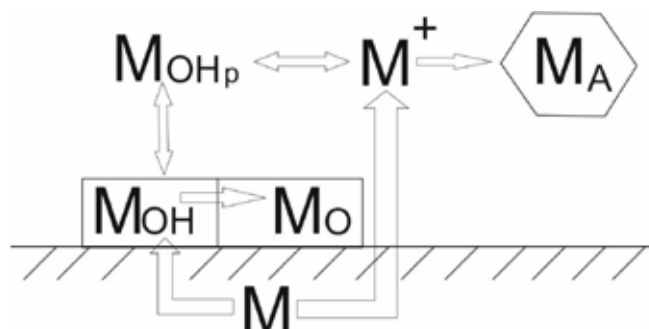
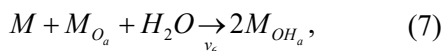
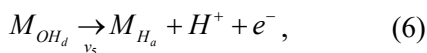
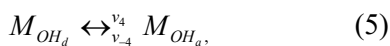
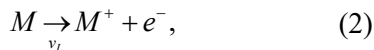


Рис. 2. Схема процесса коррозии

В качестве независимых переменных используем μ_0, μ_{OH}, K_M в качестве зависимой переменной μ_M – доля поверхности непокрытого металла:

$$\mu_M = 1 - \mu_0, \quad (1)$$

Запишем реакции, которые могут протекать на поверхности металла:



где A^n – растворенный анион, $M_n A$ – твердый осадок, v – константы скорости реакции. Индексы d, a указывают, что соответствующие виды частиц являются либо растворенными, либо адсорбированными соответственно.

В рассматриваемом случае A^{n-}, H_2O и H^+ присутствуют в избытке, а реакция (3) всегда находится в равновесии. Константы скорости в уравнении (4) представим в виде

$$v_4 = v_4' f(\mu_{OH}), \quad (8)$$

$$v_{-4} = v_{-4}' g(\mu_{OH}). \quad (9)$$

Принимая $K = [M^+]$, получим следующие дифференциальные уравнения для системы:

$$\frac{dK}{dt} = v_1 \mu_M - v_3 K^n, \quad (10)$$

$$\frac{d\mu_{OH}}{dt} = v_4' K \mu_M f(\mu_{OH}) - [v_5 + v_{-4}' g(\mu_{OH})] \mu_{OH} + 2v_6 \mu_O \mu_M, \quad (11)$$

$$\frac{d\mu_O}{dt} = v_5 \mu_{OH} - v_6 \mu_O \mu_M, \quad (12)$$

где μ_M – доля оголенной металлической поверхности.

Введем в модель безразмерные переменные:

$$\tau = v_4 t, \quad Z = VK \quad (13)$$

и безразмерные параметры:

$$V = \frac{v_4'}{v_4}, h = \frac{v_1 V}{v_4}, j = \frac{v_3}{v_4' V^{n-1}}, l = \frac{v_5}{v_4}, s = \frac{v_6}{v_4}. \quad (14)$$

Таким образом, получим дифференциальные уравнения в безразмерных переменных:

$$\frac{dZ}{d\tau} = h\mu_M - jZ^n, \quad (15)$$

$$\frac{d\mu_{OH}}{d\tau} = Z\mu_M f(\mu_{OH}) - [l + g(\mu_{OH})] \mu_{OH} + 2s\mu_O \mu_M, \quad (16)$$

$$\frac{d\mu_O}{d\tau} = l\mu_{OH} - s\mu_O \mu_M. \quad (17)$$

Уравнения (15)–(17) образуют систему связанных автономных нелинейных дифференциальных уравнений с тремя независимыми переменными состояния. Рассматривается случай однозарядного аниона и принимается, что $f(\mu_{OH}) = 1$, $g(\mu_{OH}) = \exp(-\alpha\mu_{OH})$, где α – положительная безразмерная константа. Поскольку состояние системы описывается положением точки в трехмерном фазовом пространстве, т.е. в системе координат $\mu_0 - \mu_{OH} - K_M$ то, решив систему нелинейных дифференциальных уравнений (15)–(17) и построив на основании полученных данных фазовую траекторию движения фигуративной точки, можно вычислить скорость изменения каждого из этих параметров. Таким образом, в качестве необходимых параметров для построения фазовых траекторий выбираем параметры $\mu_0 - \mu_{OH} - K_M$

Результаты исследования и их обсуждение

С помощью инструментов Zet Lab и языка программирования Python разработан программный комплекс, позволяющий решать необходимые кинетические уравнения и на основании полученных данных строить фазовые траектории. На рис. 3 изображена проекция фазовой траектории на плоскость $\mu_0 - \mu_{OH}$ построенная в разработанном программном комплексе.

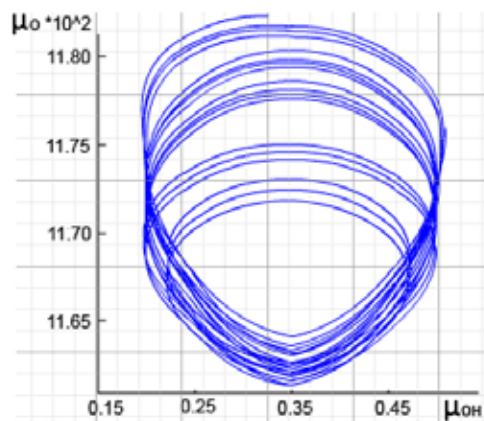


Рис. 3. Проекция фазовой траектории процесса коррозии на плоскость $\mu_0 - \mu_{OH}$

Как видно из рисунка, траектория процесса коррозии представляет довольно сложную фигуру, имеющую хаотичную динамику. Важно найти порядок и закономерности в детерминированном хаосе и правильно отличить его от стохастического процесса. Автор работы [12] приводит процедуру, доказывающую, что траектория системы в правильно выбранном фазовом пространстве представляет собой странный аттрактор, а процесс коррозии может быть подавлен путем наложения на систему специально подобранных параметров, при которых аттрактор системы обращается в точку.

С помощью языка программирования Python разработан программный комплекс, реализующий метод возвратных карт, который применяется для построения фазовых траекторий на основании полученных данных. Подбирается промежуток времени τ , через который высота пиков коррозионного тока повторяется, а затем строится фазовая траектория в координатах $I(t) - I(t+\tau)$ (рис. 5).

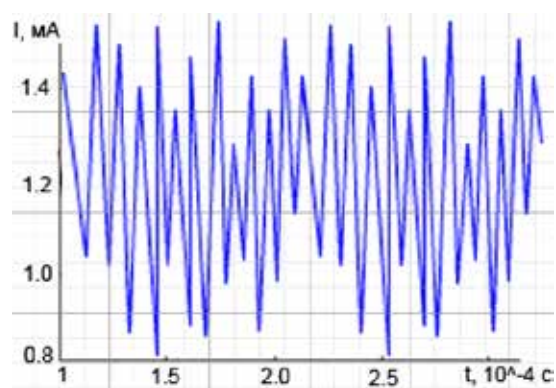


Рис. 4. График изменения коррозионного тока, полученный экспериментально

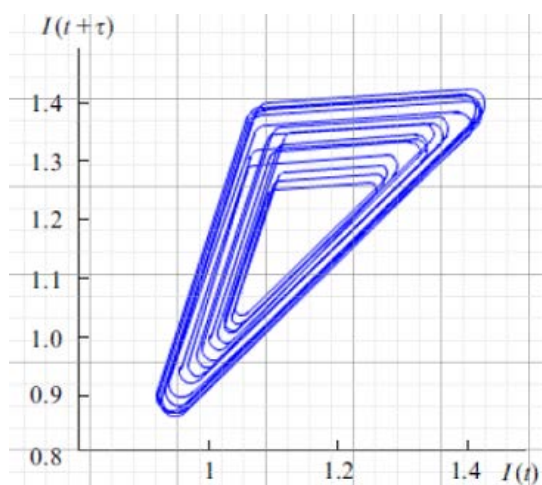


Рис. 5. Восстановление аттрактора по экспериментальной зависимости

Траекторией системы в правильно выбранном фазовом пространстве является странный аттрактор. Это свидетельствует о том, что коррозионный процесс содержит скрытый порядок, несмотря на то, что, на первый взгляд, ток коррозии меняется случайным образом.

Результаты моделирования показывают: чтобы подавить процесс коррозии, необходимо рассчитать параметры, при которых аттрактором системы станет точка.

Заключение

В результате исследований установлено, что фазовая траектория исследуемой системы является детерминированной. Это свидетельствует о том, что коррозионный процесс содержит скрытый порядок, несмотря на то, что, на первый взгляд, ток коррозии меняется случайным образом. Имеется возможность способствовать уменьшению коррозионных процессов за счет специально рассчитанных параметров внешнего воздействия. В качестве накладываемых на систему параметров можно использовать специально рассчитанный импульс напряжения. Результаты будут полезны при разработке прикладных средств для борьбы с коррозионными процессами.

Работа выполнена при поддержке ОАО «РЖД» грант № 4222988.

Список литературы

1. Воробьева В.И., Чигиринец Е.Э., Воробьева М.И. Использование летучих ингибиторов коррозии на основе отходов растительного сырья для защиты металла, покрытого продуктами коррозии // Инновационные технологии: теория, инструменты, практика. Пермь: Изд-во Пермского национального исследовательского политического университета. 2014. Т. 2. С. 17–20.
2. Qiu H.J., Peng L., Li X., Xu H.T., Wang Y. Using corrosion to fabricate various nanoporous metal structures. Corrosion Science. March 2015. Vol. 92. P. 16–31.
3. Perino G., Wilner G., Kaplowitz E., Ricciardi B.F., Boettner F., Westrich G.H., Jerabek S.A., Goldring S.R., Purdue P.E. Adverse local tissue reaction (ALTR) associated with corrosion products in metal-on-metal and dual modular neck total hip replacements is associated with up regulation of interferon gamma-mediated chemokine signaling. Journal of Orthopaedic Research. October 2015. Vol. 33. Iss. 10. P. 1487–1497.
4. Men H., Sun B., Zhao X., Li X., Liu J., Xu Zh. Dynamics of stainless steel corrosion based on the theory of phase space reconstruction and chaos. Anti-Corrosion Methods and Materials. 2016. Vol. 63. Iss. 3. P. 214–225.
5. Wei Y., Xia D., Song Sh. Detection of SCC of 304 NG stainless steel in an acidic NaCl solution using electrochemical noise based on chaos and wavelet analysis. Russian Journal of Electrochemistry. June 2016. Vol. 52. Iss. 6. P. 560–575.
6. Pavlidou M., Pagitsas M., Sazou D. Potential oscillations induced by the local breakdown of passive iron in sulfuric acid media. An evaluation of the inhibiting effect of nitrates on iron corrosion. Journal of Solid State Electrochemistry. November 2015. Vol. 19. Iss. 11. P. 3207–3217.

7. Valora A., Alfonsob L., Caleyoa F., Vidalc J., Perez-Baruchd E., Hallena J.M. The negative binomial distribution as a model for external corrosion defect counts in buried pipelines. *Corrosion Science*. December 2015. Vol. 101. P. 114–131.

8. Padash R. et al. Corrosion control of aluminum in the solutions of NaCl, HCl and NaOH using 2, 6-dimethylpyridine inhibitor: Experimental and DFT insights. *Materials Chemistry and Physics*. 2020. T. 244. P. 122681.

9. Korchagin S.A., Terin D.V. Development program complex for the suppression of chaos in the process of corrosion of metals. *Conference Proceedings – 2016 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering*. 2016. P. 267–272.

10. Третьяков Ю.Д. Процессы самоорганизации в химии материалов // *Успехи химии*. 2003. Т. 72. №. 8. С. 731–763.

11. Степанов В.В., Дубинин Р.Р. Определение количественных показателей негативных последствий в результате катастроф техногенного характера при проведении категорирования и оценки уязвимости объектов транспортной инфраструктуры // *Редакционная коллегия*. 2018. С. 160.

12. Виноградова С.С., Сафиуллин А.Р., Маркелов В.О. Коррозия подземных сооружений под действием блуждающего тока на примере установки, имитирующей условия электрифицированного рельсового транспорта // *Вестник Технологического университета*. 2019. Т. 22. №. 9. С. 46–50.