

УДК 621.316.9

## ГРАФО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ ИНЖЕНЕРНЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА КОРРОЗИОННЫХ ТОКОВ МНОГОЭЛЕКТРОДНОЙ СИСТЕМЫ

А.И. Мозилов, Г.В. Иванов, Л.Д. Сафрошкина, Ю.В. Демин

ФГОУ Новосибирская государственная академия водного транспорта, г. Новосибирск

E-mail: gennad-ivanov@yandex.ru

*Проанализированы методы расчета коррозионных токов многоэлектродной системы. Приведен алгоритм графо-аналитического инженерного метода расчета коррозионных токов многоэлектродной системы, включающий в себя принципы графического и аналитического методов расчета. Для наглядности рассмотрен случай с тремя электродами: медный, железный, сплав Р1.*

Основными конструктивными элементами современных электроустановок являются железобетонные и стальные конструкции. Следовательно, эти материалы должны быть в поле зрения при исследованиях по обеспечению долговечности электросетевых конструкций.

Для обеспечения долговечности электросетевых конструкций и, в большей степени для проектируемых конструкций и заземляющих систем из них, необходим расчет коррозионных токов и потенциалов [1–3].

Существуют аналитический, численный и графический методы расчета коррозионных токов.

Графический метод расчета коррозионных токов заключается в анализе поляризационных кривых (анодных и катодных) в данных условиях коррозии и определении величины общего потенциала корродирующей системы ( $U_0$ ). Однако, данный метод не позволяет исследовать реальное сооружение в лабораторных условиях.

Аналитическими и численными методами рассчитывается какой-либо один вид коррозии, обычно это коррозия под действием гальванопары.

Расчет работы каждого отдельного электрода многоэлектродной системы с любым количеством электродов аналитическим способом исходит из двух утверждений [3]:

1. Если многоэлектродная гальваническая система действительно замкнута накоротко во внешней и внутренней цепи, то потенциал отдельных ее составляющих вследствие явления поляризации выравнивается около какого-то общего потенциала  $U_0$ .
2. Если многоэлектродная система находится в стационарном состоянии, то есть в отдельных ее точках не происходит накопления зарядов во времени, то сумма всех катодных токов системы точно равна сумме всех анодных токов.

Далее, следуя алгоритму данного метода, составляется система уравнений в виде матриц:

$$\begin{pmatrix} R_{11} & \dots & R_{1p} & \dots & R_{1n} & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{p1} & \dots & R_{pp} & \dots & R_{pn} & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{n1} & \dots & R_{np} & \dots & R_{nn} & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} I_1 \\ \dots \\ I_p \\ \dots \\ I_n \\ U_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_1 \\ \dots \\ U_p \\ \dots \\ U_n \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где:  $R_{ij}$  – собственные и взаимные значения поперечных сопротивлений между  $i$ -м и  $j$ -м элементами;  $I_j$  – поперечный ток, стекающий (втекающий) с  $j$ -го элемента;  $U_0$  – компромиссный потенциал системы рассматриваемых элементов, соединенных «звездой»;  $U_i$  – исходные (задаваемые) электродные потенциалы одиночных элементов (до их соединения в систему).

Собственное ( $i=j$ ) значения поперечного сопротивления определяется следующим образом:

$$R_{ii} = R_{ii}^r + R_{ii}^u + R_{ii}^{A,K}, \quad (2)$$

где  $R_{ii}^r$  – сопротивление растеканию металл-грунт;  $R_{ii}^u$  – поперечное сопротивление изоляционного покрытия элемента (при его наличии);  $R_{ii}^{A,K}$  – сопротивление поляризации (анодное или катодное) рассматриваемого элемента.

Сопротивление растеканию металл-грунт вычисляются по формуле:

$$R_{ii}^r = \frac{1}{2} \frac{\rho}{\pi \Gamma} \ln \frac{4l}{d}, \quad (3)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление грунта;  $\Gamma$  – главный (наибольший) размер заземлителя, м;  $l$  – длина вертикального заземлителя, м;  $d$  – диаметр вертикального заземлителя, м.

Трудность решения рассматриваемой системы уравнений, а, следовательно, и сложность метода расчета, заключается в определении типа (анодное или катодное) сопротивления поляризации соединенных в систему элементов.

Действительно, знак поперечного тока  $I_j$  («плюс» – катодный, «минус» – анодный) определяет величину сопротивления поляризации, поскольку значения  $R_{ii}^A$  и  $R_{ii}^K$  могут существенно отличаться друг от друга. К тому же, величина  $R_{ii}^{A,K}$  является преобладающей по отношению к сопротивлению  $R_{ii}^r$ , что является решающим при отсутствии изоляционного покрытия элементов ( $R_{ii}^u$ ).

Для ориентировочного определения характера поляризации рассматриваемых элементов проводят предварительный анализ системы уравнений: преобразуют матрицу и исключают из системы некоторое « $p$ -ое» уравнение, вычитая его из остальных уравнений. Таким образом, получают вспомогательную систему уравнений, по правой части которой судят о характере поляризации: при положи-

тельной разности потенциалов используют катодное сопротивление  $R_{ii}^K$ , при отрицательной – анодное  $R_{ii}^A$ . Такому анализу подвергаются все элементы рассматриваемой системы, кроме элементов с минимальным и максимальным значениями (с учетом знака) электродного потенциала, поскольку первый из них всегда будет анодом, а второй – катодом.

Определив ориентировочный характер поляризации всех элементов сооружения и задействовав в соответствии с этим требуемые сопротивления поляризации  $R_{ii}^{A,K}$ , решают исходную систему уравнений относительно коррозионных токов и компромиссного потенциала. Сопоставляя знаки полученных коррозионных токов с результатами предварительного определения типа поляризации, убеждаются в их совпадении. В случае несовпадения знаков по отдельным элементам их тип поляризации меняют в соответствии с результатом последнего расчета, и этот расчет повторяют до полного совпадения знаков коррозионных токов по данным последнего и предыдущего расчетов, то есть запускают итерационный процесс.

Использование итерационного решения зачастую ведет к неопределенности решения, ввиду многозначности решаемой задачи.

Недостатков указанных методов можно избежать, если разработать некоторый обобщенный метод, включающий в себя положительные стороны графического и аналитического методов, так называемый графо-аналитический инженерный метод.

Приведем алгоритм метода:

1. Строим поляризационную диаграмму «Величина тока – потенциал». Наносим на одну диаграмму анодную и катодную поляризационные кривые для интересующих нас условий (анодная и катодная поляризационные кривые получают обычно в независимых опытах при поляризации от внешнего источника тока), перестроив их так, чтобы по оси абсцисс откладывалась не плотность тока  $i$ , как это делается при получении поляризационных кривых, а величина тока  $I$ . На рис. 1 схематично представлена такая диаграмма для пятиэлектродной системы. Здесь  $U_1, U_2, U_3, U_4, U_5$  – стационарные электродные потенциалы отдельных составляющих системы в условиях коррозии (соответственно для электродов 1, 2, 3, 4, 5) в отсутствие протекания тока. Кривые анодной поляризации ( $U_1A_1-U_5A_5$ ), кривые катодной поляризации ( $U_1K_1-U_5K_5$ ).
2. Строим на диаграмме суммарные кривые анодной и катодной поляризации. Суммарные кривые анодной ( $s, t, q, u$ ) и катодной ( $m, n, q, r$ ) поляризации получают путем простого сложения величин токов всех анодных процессов для каждого потенциала между  $U_1$  и  $U_5$  соответственно величин токов всех катодных процессов для того же промежутка потенциалов. Эта диаграмма будет характеризовать значение величины тока для каждого электрода системы в зави-

симости от устанавливающегося в системе общего потенциала. Этот общий потенциал многоэлектродной системы ( $U_0$ ) будет равен потенциалу, при котором сумма всех катодных токов системы будет равна сумме всех анодных токов.

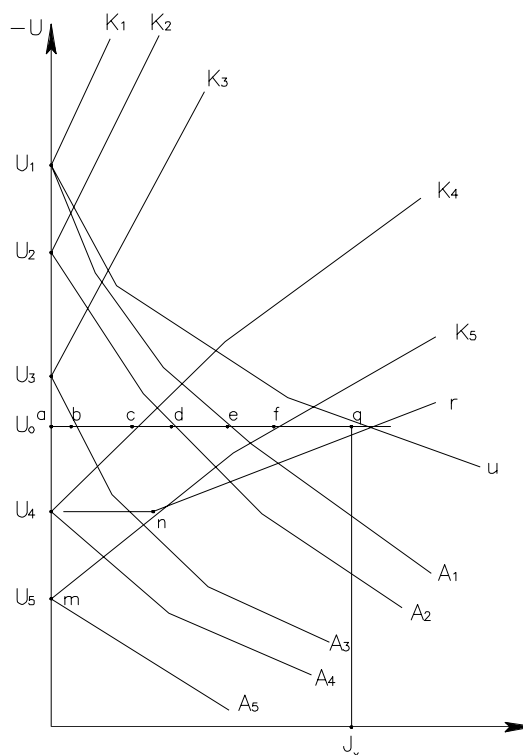


Рис. 1. Графическое решение многоэлектродной системы на основе реальных многоэлектродных кривых

3. Определяем, в каком режиме (анод или катод) работает каждый электрод многоэлектродной системы. Величины абсцисс точек пересечения кривых катодной или анодной поляризации с параллельной оси абсцисс прямой  $U_0q$  будут давать направление и величину тока в каждом электроде этой системы. В данном примере у электродов 4 и 5 пересекаются с прямой  $U_0q$  кривые катодной поляризации, следовательно, эти электроды будут работать катодами, при этом величина устанавливающегося на них катодного тока будет соответственно пропорциональна отрезкам  $ac$  и  $af$ .

Для электродов 1, 2, и 3 с прямой  $U_0-q$  пересекаются кривые анодной поляризации. Следовательно, электроды 1, 2 и 3 будут работать в данной системе анодами, причем величины анодного тока соответственно будут определяться величинами отрезков  $ae, ad$  и  $ab$ . Из этой диаграммы видно, что кривая анодной поляризации для наиболее положительного электрода и кривая катодной поляризации для наиболее отрицательного электрода излишни для данного построения, так как они не могут быть суммированы с кривыми анодной и соответственно катодной поляризации в промежутке потенциалов  $U_1$  и  $U_0$ .

4. Составляем систему уравнений в виде матриц (1). Для составления системы уравнений необходимо определить собственные и взаимные сопротивления электродов. Собственные значения поперечных сопротивлений рассчитываются по формуле (2). Поскольку собственные значения  $R_{ii}$  поперечных сопротивлений существенно превосходят их взаимные значения  $R_{ij}$ , для упрощения расчета значения последних принимаем равными нулю.
5. Решаем систему ур. (1) относительно неизвестных коррозионных токов и компромиссного потенциала системы.

Рассмотрим работу метода расчета коррозионных токов на примере трех электродов: медный (Cu), железный (Fe), сплав (P1). Радиус поперечного сечения электродов  $r_3=0,3$  см, а длина первых двух электродов 4,0 см и третьего – 3,5 см. Все электроды были помещены в бак и частично выходили на дневную поверхность, располагались друг от друга на расстоянии 7 см, т. е. по вершинам равностороннего треугольника. Собственные значения сопротивления растеканию этих электродов составили для первых двух электродов  $R_3^i=120$  Ом, а для третьего –  $R_3^i=131$  Ом. Удельное сопротивление (наполнителя бака) составляло ориентировочно  $\rho \approx 10$  Ом·м.

На рис. 2 представлены поляризационные кривые рассматриваемых электродов (диаграмма Эванса). Их электродные потенциалы составили:  $U_{Cu}=-0,112$  В,  $U_{Fe}=-0,525$  В и  $U_{P1}=-0,970$  В. Анодные ( $Cu^A, Fe^A, P1^A$ ) и катодные ( $Cu^K, Fe^K, P1^K$ ) поляризационные кривые исследуемых электродов показаны на рис. 2 штрихпунктиром. Суммарные кривые поляризации и сопротивления растеканию для рассматриваемых электродов изображены на рис. 2 в виде сплошных линий. Из полученной диаграммы определяем, в каком режиме работают электроды: электрод P1 выступает в роли анода, для него строим только анодную суммарную кривую, а электрод Cu оказался катодом, для него показана только катодная кривая, электрод Fe является анодом по отношению к остальным электродам.

Таким образом, из диаграммы находим анодные сопротивления для электродов P1 и Fe, а также катодное сопротивление для электрода Cu.

Следующим шагом, согласно алгоритму, является определение собственного значения поперечного сопротивления электродов по формуле (2), получаем:  $R_{Cu}^i=181$  Ом,  $R_{Fe}^i=215$  Ом,  $R_{P1}^i=239$  Ом.

Далее составляем систему уравнений и представляем её в виде матриц:

$$\begin{vmatrix} 181 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 215 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 239 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} I_{Cu} \\ I_{Fe} \\ I_{P1} \\ U_0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -0,211 \\ -0,525 \\ -0,970 \\ 0 \end{vmatrix}$$

Решением системы уравнений является следующая матрица:

$$\begin{vmatrix} I_{Cu} = 2,12 \text{ mA} \\ I_{Fe} = -0,16 \text{ mA} \\ I_{P1} = -1,96 \text{ mA} \\ U_0 = -0,511 \text{ V} \end{vmatrix}$$

Теперь попробуем проследить, как повлияет на коррозионный процесс увеличение площади катода в четыре раза, то есть  $L_{Cu}=16,0$  см. Тогда  $R_{Cu}^i=108$  Ом. Система уравнений при этом будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{vmatrix} 108 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 215 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 239 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} I_{Cu} \\ I_{Fe} \\ I_{P1} \\ U_0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -0,211 \\ -0,525 \\ -0,970 \\ 0 \end{vmatrix}$$

Решением данной системы уравнений является матрица:

$$\begin{vmatrix} I_{Cu} = 2,11 \text{ mA} \\ I_{Fe} = -0,31 \text{ mA} \\ I_{P1} = -1,80 \text{ mA} \\ U_0 = -0,408 \text{ V} \end{vmatrix}$$

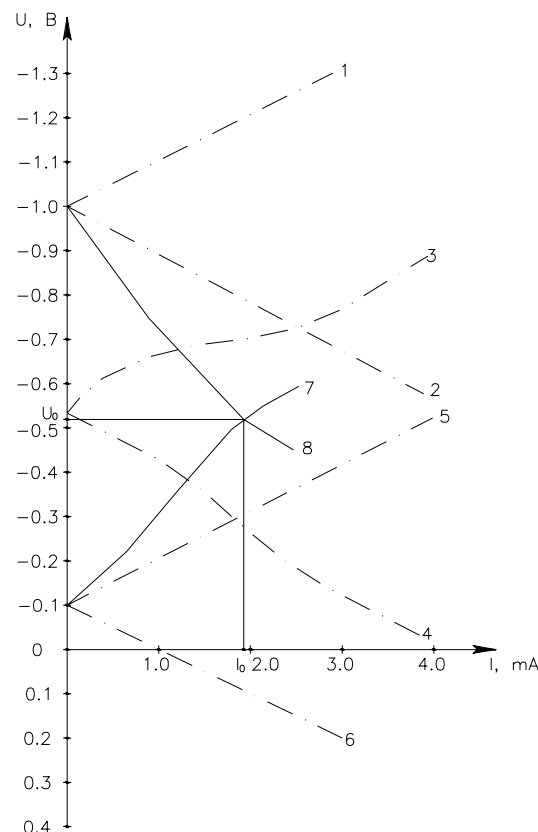


Рис. 2. Диаграмма Эванса

Результаты расчета показывают, что увеличение площади, например, катода в четыре раза, приводит к увеличению анодного тока Fe в 2 раза. Этот вывод имеет и практическое значение. Например, расширение действующей подстанции приводит к изме-

нению условий коррозии в заземляющей системе, что необходимо учитывать при проектировании реконструкции подстанции. Аналогичным образом мы можем проследить, как изменятся коррозионные токи и компромиссный потенциал системы при изменении удельного сопротивления среды, т. е. при изменении условий коррозии.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дёмин Ю.В., Дёмина Р.Ю., Горелов В.П. Обеспечение долговечности электросетевых материалов и конструкций в агрессивных средах: в 2 ч. Ч. 1. Теоретические основы / Ю.В. Дёмин, Р.Ю. Дёмина, В.П. Горелов; под ред. В.П. Горелова. – Новосибирск: Новосиб. гос. акад. водного транспорта, 1998. – 209 с.

Вывод: получен универсальный метод расчета коррозионных токов, позволяющий достаточно точно определять режимы работы каждого из электродов в многоэлектродной системе, а также проследить, каким образом влияет на коррозионные процессы изменение размеров электродов и условий, в которых находится система.

2. Карякин Р.Н. Заземляющие устройства электроустановок: справочник. – М.: ЗАО «Энергосервис», 1998. – 376 с.  
3. Томашов Н.Д. Теория коррозии и защита металлов. – М.: АН СССР, 1959. – 600 с.

Поступила 03.11.2006 г.

УДК 621.315.592

## НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВ В УСЛОВИЯХ СТРИМЕРНОГО РАЗРЯДА

В.В. Парашук, К.И. Русаков\*

Институт физики им. Б.И. Степанова НАНБ, г. Минск  
\*Брестский государственный технический университет  
E-mail: v\_shchuka@rambler.ru

*Промоделированы нелинейные оптические явления при стримерном разряде в гексагональных и кубических полупроводниках и показана возможность в этих условиях эффекта самоканалирования света.*

Открытие стримерных разрядов в полупроводниках, сопровождающихся интенсивным лазерным эффектом (1973 г. [1]), стимулировало, с одной стороны, дальнейшее развитие физики пробойных и предпробойных явлений в сильных полях в твердых телах и, с другой стороны, способствовало возникновению нового научного направления – физики стримерного разряда в полупроводниках и физики стримерных лазеров. В настоящее время одной из тенденций в физике и технике полупроводниковых приборов является создание перспективных транзисторов, интегральных микросхем (оптоэлектронных систем) и новой элементной базы оптоакустоэлектроники на основе использования прямозонных материалов с большой шириной запрещенной зоны. В указанных соединениях роль излучательных, в том числе нелинейных оптических, процессов велика и проявляются они наиболее ярко, поэтому вопросы о протекающих в сильных электрических полях явлениях и взаимодействии оптических и электрических полей в данных средах актуальны. В этой связи представляется необходимым исследование соответствующих процессов при стримерном разряде в широкозонных полупроводниках, что связано с необычностью свойств и сложностью данного явления, возможностью получения новой информации о строении вещества и перспективой широких практических применений.

Пиковое значение интенсивности светового поля в канале стримерного разряда достигает значений  $\sim 10^9 \dots 10^{11}$  Вт/см<sup>2</sup> и достаточно для возникновения различных нелинейных оптических эффектов в полупроводниках, в частности, самовоздействия излучения в режиме автоканалирования [2]. Однако в этих условиях, в том числе в средах с кубической ( $n_2$ ) и пятого порядка ( $n_4$ ) нелинейностями, коэффициенты  $n_2$ ,  $n_4$  и остальные параметры рассматриваемой задачи – радиус волнового фронта, размеры и характер исходного пучка (двух- или трехмерный случай), детально не известны, в связи с чем требуется численное моделирование процесса. Ниже анализируются пороговые, энергетические и пространственные характеристики эффекта в зависимости от величин нелинейностей и других параметров для гексагональных и кубических полупроводников, рассмотрены условия оптимального автоканалирования.

В широкозонных соединениях типа  $A_2B_6$  (гексагональных CdS, CdSe и кубических CdTe) эффекты самовоздействия носят сложный характер в зависимости от длительности импульсов, способа возбуждения (однофотонное, двухфотонное) и других условий, проявляющийся в конкуренции процессов самофокусировки и дефокусировки [3, 4]. При этом реализуется совместное действие нелинейностей  $n_2 + n_4$  ( $n_2 > 0$ ,  $n_4 < 0$ ). Для указанных сред разработана теория самоканалирования (самоканализа-