

## РАСЧЕТ КАТОДНОЙ ЗАЩИТЫ ЭКВИПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

Л.Д. Сафрошкина, Ю.Р. Гунгер, Ю.В. Демин

Новосибирская государственная академия водного транспорта. г. Новосибирск

E-mail: ngavt@ngs.ru

Рассматривается метод расчета катодной защиты линейных коррозионных систем. При этом между заземляющей системой и анодами подключается источник постоянного напряжения, которое делится между анодными и катодными частями сооружения пропорционально их входным сопротивлениям.

Расположение заземляющих систем в агрессивных грунтово-климатических условиях приводит к интенсивной коррозии их элементов. Разрушаются искусственные заземлители, кабели, трубопроводы и железобетонные конструкции [1]. Одним из вариантов повышения их долговечности является применение катодной защиты.

С этой целью необходимо разработать математическую модель катодной защиты с учетом действующего на элемент напряжения, его поперечного сопротивления и взаимных сопротивлений.

Основой для математической модели катодной защиты может быть метод расчета коррозионных токов заземляющей системы, основанный на теории многоэлектродных электрохимических систем Н.Д. Томашова [2].

При применении катодной защиты от коррозии между анодными (предназначенными для разрушения) и катодными (защищаемыми) элементами сооружения подключается источник постоянного напряжения  $E$ . Это напряжение  $E$  делится между анодными  $E_A$  и катодными  $E_K$  частями сооружения пропорционально их входным сопротивлениям:

$$E_A = E \frac{R_A}{R_A + R_K} \quad \text{и} \quad E_K = E \frac{R_K}{R_A + R_K}, \quad (1)$$

где  $R_A$  и  $R_K$  – входное сопротивление анодной и катодной частей сооружения.

Соответственно этому определяется и тип сопротивления поляризации для анодных  $R_i^A$  и катодных  $R_i^K$  элементов сооружения.

Характер поляризации как бы определяется выбранной схемой защиты. Вместе с тем, как будет показано ниже, примененная защита может оказаться недостаточной и отдельные защищаемые элементы будут иметь анодную поляризацию, а, следовательно, и соответствующее ему сопротивление  $R_i^A$ .

При эквипотенциальном характере сооружения, когда продольным сопротивлением элементов можно пренебречь, напряжения  $E_A$  и  $E_K$  непосредственно добавляются (алгебраически) к электродным потенциалам защищаемых (катодных) и разрушаемых (анодных) элементов:

$$U_i^A = U_i - E_A \quad \text{и} \quad U_i^K = U_i - E_K. \quad (2)$$

Собрав поперечные сопротивления анодных и катодных элементов в отдельные квадратные мат-

рицы, порядок которых будет определяться соответственно числом анодных ( $n_A$ ) и катодных ( $n_K$ ) элементов, обратив эти матрицы, получим:

$$\|G_{ij}^A\| = \|R_{ij}^A\|^{-1} \quad \|G_{ij}^K\| = \|R_{ij}^K\|^{-1}. \quad (3)$$

Просуммировав все проводимости обращенных анодных  $\|G_{ij}^A\|$  и катодных  $\|G_{ij}^K\|$  матриц, найдем входные сопротивления анодной и катодной частей сооружения для случая эквипотенциальной расчетной модели:

$$G_{\Sigma}^A = \sum_{i=1}^{n_A} \sum_{j=1}^{n_A} G_{ij}^A \Rightarrow R_A = \frac{1}{G_{\Sigma}^A},$$

$$G_{\Sigma}^K = \sum_{i=1}^{n_K} \sum_{j=1}^{n_K} G_{ij}^K \Rightarrow R_K = \frac{1}{G_{\Sigma}^K}. \quad (4)$$

Определив из ур. (3) и (4) значения входных сопротивлений  $R_A$  и  $R_K$ , найдем с помощью выражений (1) и (2) величины анодных и катодных защитных напряжений и суммарные значения ( $U_i^A, U_i^K$ ) электродных потенциалов для всех элементов сооружения. Собрав после этого исходную систему уравнений для рассматриваемого вида коррозии, где последнее уравнение системы фиксирует равенство нулю суммы стекающих с элементов (катодных) и втекающих в них (анодных) токов:

$$\begin{vmatrix} R_{11}, \dots, & R_{1p}, \dots, & R_{1n}, \dots, & 1 \\ R_{p1}, \dots, & R_{pp}, \dots, & R_{pn}, \dots, & 1 \\ R_{n1}, \dots, & R_{np}, \dots, & R_{nn}, \dots, & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_p \\ \bar{I}_n \\ U_0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} U_1 \\ U_p \\ U_n \\ 0 \end{vmatrix}, \quad (5)$$

где  $R_{ij}$  – собственные и взаимные значения поперечных сопротивлений между  $i$ -ым и  $j$ -ым элементами;  $\bar{I}_j$  – поперечный ток, стекающий (втекающий) с  $j$ -ого элемента;  $U_0$  – компромиссный потенциал системы рассматриваемых элементов, соединенных "звездой";  $U_i$  – исходные (задаваемые) электродные потенциалы одиночных элементов (до их соединения в систему).

В состав собственного ( $i=j$ ) значения поперечного сопротивления  $R_{ii} = R_{ii}^e + R_{ii}^u + R_{ii}^{A,K}$  входят:  $R_{ii}^e$  – 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.

Решив систему уравнений, найдем значения коррозионных токов, для анодной и катодной частей рассматриваемого сооружения:

$$\|R_{ij}^*\| \times \|I_j^*\| = \|U_{i*}^{A,K}\| \Rightarrow \|R_{ij}^*\|^{-1} \times \|U_{j*}^{A,K}\| = \|\bar{I}_i^*\|, \quad (6)$$

где индексом "A,K" обозначена принадлежность рассматриваемого суммарного потенциала к анодной или катодной поляризации, а "\*" указывает на наличие в числе "неизвестных" компромиссного потенциала  $U_0$ .

### Контрольные расчеты катодной защиты

Контрольные расчеты для модели заземлителя (рис. 1 [3]) и исходных данных (табл. 1) катодной защиты приведены в табл. 2. В качестве анодной (разрушаемой) части сооружения принимался один вертикальный элемент № 13, все же остальные элементы (горизонтальные) рассматривались в качестве защищаемых (катодных). Таким образом, защитное напряжение  $E=6,0$  В подключалось как бы "вразрез" узла № 5 между верхним концом вертикального элемента № 13 и примыкающими к названному узлу концами горизонтальных элементов №№ 3, 4, 9 и 10.

**Таблица 1.** Электрохимические характеристики элементов заземляющей системы для контрольной расчетной модели

Номер элементов	Сопротивление поляризации, Ом		Электродный потенциал, В	Сопротивления растеканию «металл-грунт», $R_{ii}^r$ , Ом
	$R_{\text{Э}}^A$	$R_{\text{Э}}^K$		
1	82,22	36,30	-0,12	6,11
2	183,48	27,12	-0,10	
3	400,27	36,91	-0,24	
4	221,87	21,87	-0,28	
5	57,14	60	-0,35	
6	51,51	40,40	-0,21	
7	18,69	20,56	-0,33	
8	33,73	19,68	-0,28	
9	61,92	16,54	-0,30	
10	6,30	6,30	-0,51	
11	40,00	53,53	-0,51	
12	40,00	37,37	-0,47	
13	14,04	137,37	-0,37	

**Примечание:** Взаимные сопротивления растеканию элементов, Ом, для:

- параллельных горизонтальных 0,87;
- ортогональных горизонтальных 1,10;
- горизонтального и вертикального 1,93

Для рассматриваемой эквипотенциальной расчетной модели входные сопротивления анодной и катодной частей сооружения  $R_A=31,63$  Ом и  $R_K=3,16$  Ом, а защитные напряжения – соответственно  $E_A=5,46$  В и  $E_K=0,54$  В. Полученные при этом суммарные (вместе с защитными напряжениями) значения электродных потенциалов (для случая грунтовой коррозии) и расчетные значения коррозионных токов приведены в табл. 2. Величина компромиссного потенциала составила  $-0,15$  В. Как следует из расчетов, в результате катодной защиты электродные потенциалы всех горизонтальных (защищаемых) элементов оказались выше величины компромиссного потенциала, что и определило катодный характер действующих на них

коррозионных токов. С другой стороны, резко отрицательный электродный потенциал вертикального элемента № 13 определяет большой уровень действующих на него анодных коррозионных токов, ведущих к его усиленному разрушению.

В случае катодной защиты прямая зависимость между действующим на элемент напряжением, его поперечным сопротивлением  $R_{ij}$  и коррозионным током  $I_j$  нарушается из-за действия взаимных сопротивлений  $R_{ij}$  особенно со стороны  $j$ -ых элементов с большими коррозионными токами  $I_j$ . Так, например, для элемента № 10, обладающего минимальным потенциалом (175 мВ) и сопротивлением  $R_{ij}=12,4$  Ом, получен максимальный коррозионный ток 33,7 мВ, в тоже время, для элемента № 2 (потенциал 596 мВ и  $R_{ij}=33,2$  Ом) катодный ток 18,1 мА.

В целом, защита от грунтовой коррозии достигнута, о чем свидетельствуют положительные (катодные) значения токов на горизонтальных элементах.

**Таблица 2.** Суммарные (с защитными напряжениями) значения электродных потенциалов и коррозионных токов для катодной защиты от грунтовой коррозии

Номер элементов	Электродные потенциалы, В	Коррозионный ток, мА
1	0,43	13,64
2	0,44	18,11
3	0,30	15,52
4	0,26	23,32
5	0,20	5,22
6	0,34	10,63
7	0,22	14,10
8	0,26	16,51
9	0,24	27,70
10	0,02	33,69
11	0,03	3,07
12	0,08	5,38
13	-5,82	-186,88

К недостаткам катодной защиты следует отнести:

1. Сравнительно большие затраты (по сравнению с пассивными методами защиты), в том числе на электроэнергию. Следовательно, необходимо решать вопросы по экономии электроэнергии.
2. Катодная поляризация элементов заземляющей системы обеспечивает только защиту металлических конструкций и не может защитить бетон от разрушения, т.к. он разрушается по другому механизму (например, от действия "физической коррозии"). Для таких элементов необходима разработка других методов защиты.

### Выводы

1. Разработана математическая модель для расчета катодной защиты от коррозии заземляющих систем, состоящих из горизонтальных и вертикальных линейных элементов, учитывающая электродные электрохимические потенциалы элементов, их коррозионные токи, сопротивления поляризации, а также их (элементов) сопротивления растеканию и взаимные сопротивления.

2. Установлено, что при осуществлении катодной защиты прямая зависимость между действующим на элемент напряжением, его поперечным сопротивлением и коррозионным током нару-

шается из-за большого влияния взаимных сопротивлений, особенно со стороны  $j$ -ых элементов с большими коррозионными токами  $I_j$ .

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Демин Ю.В., Демина Р.Ю., Горелов П.В. Обеспечение долговечности электросетевых материалов и конструкций в агрессивных средах. Кн. 1. Теоретические основы / Под ред. д.т.н., проф. В.П. Горелова. — Новосибирск: НГАВТ, 1998. — 209 с.
2. Томашов Н.Д. Теория коррозии и защиты металлов. — М.: Изд-во АН СССР, 1959. — 600 с.
3. Сафрошкина Л.Д., Гунгер Ю.Р., Демин Ю.В. Расчет коррозионных токов для модели заземляющей системы // Известия Томского политехнического университета. — 2004. — Т. 307. — № 3. — С. 109—113.

УДК 621.313.322-81:621.314:21.3.042.681

**ВЛИЯНИЕ ВХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА МАКСИМАЛЬНУЮ ТЕМПЕРАТУРУ НАЖИМНОЙ ПЛИТЫ ТУРБОГЕНЕРАТОРА**

В.С. Логинов, В.Е. Юхнов

Томский политехнический университет  
E-mail: loginovvs@tpu.ru

*Показано влияние продолжительности нагрева и параметров тепловыделения на максимальную температуру активного элемента при отсутствии отвода теплоты. Точность расчета температурного поля в активном элементе зависит от невязки дифференциального уравнения теплопроводности и числа Фурье. Установлен диапазон входных параметров, при которых сложная двумерная задача теплообмена сводится к одномерной.*

В [1] для обоснования точности инженерного расчета нестационарного температурного поля в активном элементе конечных размеров было предложено ввести в практику критерии качества расчета. Они позволяют провести проверку результатов аналитического расчета на раннем этапе моделирования теплового процесса в конкретном элементе. Проверка состоит в подстановке расчетных значений в исходные дифференциальные уравнения и краевые условия исследуемой задачи. После этого этапа рекомендуется провести сравнение с опытными или другими надежными данными и приступить к самому процессу моделирования в широком диапазоне изменения параметров исходной задачи.

Целью данной работы является выяснение влияния входных параметров на тепловое состояние нажимной плиты турбогенератора. В таком активном элементе распределение удельных тепловых потерь подчиняется следующей зависимости

$$Po(X, Y, Fo) = Po_0 \cdot W_1(X) \cdot W_2(Y) \cdot \exp(-SFo), \quad (1)$$

где  $W_1(X) = \exp(-NX)$ ,  $W_2(Y) = 1 + MY + DY^2$ .  $(2)$

$$\theta(X, Y, Fo) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{T_1(\mu_n, \gamma_m, Fo) K_1(\mu_n, X) K_2(\gamma_m, Y)}{K_{11}(\mu_n) K_{22}(\gamma_m)}. \quad (3)$$

Здесь  $\mu_n, \gamma_m$  — собственные числа. Они находят-ся из трансцендентных уравнений

$$\text{ctg} \mu = \frac{\mu^2 - Bi_1 Bi_2}{\mu(Bi_1 + Bi_2)}, \quad (4)$$

$$\text{ctg} \gamma R = \frac{\gamma^2 - Bi_3 Bi_4}{\gamma(Bi_3 + Bi_4)}. \quad (5)$$

$$K_1(\mu_n, X) = \mu_n \cos \mu_n X + Bi_2 \sin \mu_n X,$$

$$K_2(\gamma_m, Y) = \gamma_m \cos \gamma_m Y + Bi_4 \sin \gamma_m Y;$$

$$K_{11}(\mu_n) = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\mu_n^2 + Bi_2^2 + (\mu_n^2 - Bi_2^2) \times}{\sin 2\mu_n} + Bi_2(1 - \cos 2\mu_n) \right\},$$

$$K_{22}(\gamma_m) = \frac{1}{2} \left\{ \frac{(\gamma_m^2 + Bi_4^2)R + (\gamma_m^2 - Bi_4^2) \times}{\sin 2\gamma_m R} + Bi_4(1 - \cos 2\gamma_m R) \right\}.$$

$$T_1(\mu_n, \gamma_m, Fo) = Po_0 F_1(\mu_n) F_2(\gamma_m, R) F_3(\mu_n, \gamma_m, Fo),$$

где

$$F_1(\mu_n) = \frac{\mu_n^2}{(\mu_n^2 + N^2)} \left\{ \left[ \left( 1 - \frac{Bi_2 N}{\mu_n^2} \right) \sin \mu_n - \frac{1}{\mu_n} (N + Bi_2) \cos \mu_n \right] \times \exp(-N) + \frac{1}{\mu_n} (N + Bi_2) \right\};$$

$$F_2(\gamma_m, R) = \left( W_2(R) - \frac{2D}{\gamma_m} \right) \left( \sin \gamma_m R - \frac{Bi_4}{\gamma_m} \cos \gamma_m R \right) + \frac{1}{\gamma_m} (M + 2DR) \cdot K_2(\gamma_m, R) + \frac{Bi_4}{\gamma_m} \left( 1 - \frac{2D}{\gamma_m} \right) - \frac{M}{\gamma_m};$$

$$W_2(R) = 1 + MR + DR^2;$$

$$K_2(\gamma_m, R) = \gamma_m \cos \gamma_m R + Bi_4 \sin \gamma_m R;$$

$$F_3(\mu_n, \gamma_m, Fo) = \frac{1}{\mu_n^2 + \gamma_m^2 - S} \left\{ \exp(-SFo) - \exp[-(\mu_n^2 + \gamma_m^2)Fo] \right\}$$

При отсутствии охлаждения  $Bi_{1,2,3,4} \rightarrow 0$  собственные числа находятся из уравнений вида: