

ЭКСТРЕМАЛЬНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ПОТЕНЦИАЛОВ ОТСАСЫВАЮЩИХ ПУНКТОВ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ ТРАМВАЯ

В. Ю. Сокович

Общепринятым критерием, определяющим опасность электрокоррозии металлических подземных сооружений блуждающими токами, является интегральное значение тока утечки с близлежащих участков рельсовых сетей электрифицированного транспорта. Обоснование этого критерия дано

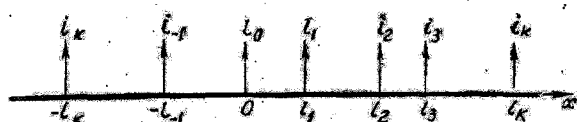


Рис. 1. Схема бесконечно протяженного участка тяговой сети с произвольным количеством нагрузок.

И. В. Стрижевским. В работе [1] им показано, что максимальное значение тока утечки с металлического подземного сооружения, проложенного параллельно участку рельсового пути, пропорционально ин-

тегральному значению тока утечки с этого участка.

В свою очередь, интегральное значение тока утечки существенно зависит от разности потенциалов отсасывающих пунктов [2]. На основании проведенных исследований принято [3], что минимальному значению интегрального тока соответствует эквипотенциальный режим работы отсасывающих пунктов. Однако строгого доказательства этого вывода в существующих работах не приводится.

Для определения наиболее выгодного режима работы отсасывающих пунктов рассмотрим самый общий случай схемы тяговой сети.

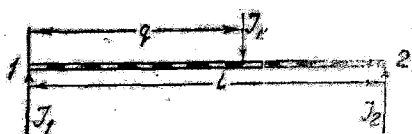


Рис. 2. Участок двухстороннего питания с одной сосредоточенной перемещающейся нагрузкой

На рис. 1 приведена схема тяговой сети для случая бесконечно-протяженного участка рельсовой сети с произвольным количеством тяговых подстанций.

При практических расчетах удобно пользоваться схемой двухстороннего отсасывания. Влиянием смежных участков рельсовой сети в этом случае можно пренебречь [1]. Для упрощения выкладок выгоды удобнее проводить для случая одной сосредоточенной движущейся нагрузки, а затем обобщить их на случай произвольного числа нагрузок. Общность выводов при этом сохраняется.

Таким образом, для дальнейших рассуждений принимается схема двухстороннего отсасывания с одной сосредоточенной движущейся нагрузкой (рис. 2).

Распределение токов и напряжений вдоль участка записывается в следующем виде: для участка $0 \leq x \leq q$ (за начало координат принята точка 1):

$$I_{x1} = -I_1 \frac{\operatorname{sh} \alpha x + \operatorname{sh} \alpha (q - x)}{\operatorname{sh} \alpha q}; \quad (1)$$

$$U_{x1} = -I_1 \frac{r}{\alpha} \frac{\operatorname{ch} \alpha x - \operatorname{ch} \alpha (q - x)}{\operatorname{sh} \alpha q}; \quad (2)$$

для участка $0 \leq x \leq l - x$ (за начало координат принята точка 2):

$$I_{x_2} = -I_2 \frac{\operatorname{sh} \alpha x + \operatorname{sh} \alpha (l - q - x)}{\operatorname{sh} \alpha (l - q)}; \quad (3)$$

$$U_{x_2} = -I_2 \frac{r}{\alpha} \frac{\operatorname{ch} \alpha x - \operatorname{ch} \alpha (l - q - x)}{\operatorname{sh} \alpha (l - q)}, \quad (4)$$

где I_1 и I_2 — токи отсасывающих пунктов.

Минимальному значению токов участков соответствуют точки

$$x_{1\min} = \frac{q}{2}; \quad x_{2\min} = \frac{l - q}{2}.$$

Соответствующие минимальные значения токов участков равны

$$I_{x_1\min} = -I_1 \frac{1}{\operatorname{ch} \alpha \frac{q}{2}}; \quad I_{x_2\min} = -I_2 \frac{1}{\operatorname{ch} \alpha \frac{l - q}{2}}.$$

Интегральные значения токов утечки участков при приложении нагрузки в точке q :

$$i_{y_1} = I_1 - I_{x_1\min} = I_1 \left(1 - \frac{1}{\operatorname{ch} \alpha \frac{q}{2}} \right); \quad (5)$$

$$i_{y_2} = I_2 - I_{x_2\min} = I_2 \left(1 - \frac{1}{\operatorname{ch} \alpha \frac{l - q}{2}} \right). \quad (6)$$

Суммарное значение тока утечки равно

$$i_y = i_{y_1} + i_{y_2} = I_1 \left(1 - \frac{1}{\operatorname{ch} \alpha \frac{q}{2}} \right) + (I_n - I_1) \left(1 - \frac{1}{\operatorname{ch} \alpha \frac{l - q}{2}} \right). \quad (7)$$

Среднее значение интегрального тока утечки за период при перемещении нагрузки от 0 до l :

$$i_{y\text{cp}} = \frac{1}{l} \int_0^l I_1 \left(1 - \frac{1}{\operatorname{ch} \alpha \frac{q}{2}} \right) dq + \int_l^0 (I_n - I_1) \left(1 - \frac{1}{\operatorname{ch} \alpha \frac{l - q}{2}} \right) dq. \quad (8)$$

Токи отсасывающих пунктов в общем случае являются функцией местоположения нагрузки $I_1(q)$; $I_2(q)$. Полагаем, что токи отсасывающих пунктов $I_1(q)$ и $I_2(q)$ с изменением местоположения нагрузки могут изменяться по произвольному закону таким образом, чтобы $I_1(q) + I_2(q) = I_n$.

Из множества функций $I_1(q)$ и $I_2(q)$ необходимо отыскать единственное, при котором значение $i_{y\text{cp}}$ минимально, т. е.

$$i_{y\text{cp}} = \frac{1}{l} \int_0^l I_1(q) \left(1 - \frac{1}{\operatorname{ch} \alpha \frac{q}{2}} \right) dq + \frac{1}{l} \int_l^0 (I_n - I_1(q)) \left(1 - \frac{1}{\operatorname{ch} \alpha \frac{l - q}{2}} \right) dq = \min. \quad (9)$$

Данная задача относится к классу задач, решаемых методами вариационного исчисления.

Условие (9) выполняется, если подобрать такую функцию $I_1(q)$, при которой сумма подынтегральных выражений в заданном интервале $0 \leq q \leq l$ минимальна.

$$I_1(q) \cdot F_1(q) + [I_n - I_1(q)] \cdot F_2(q) = \min, \quad (10)$$

$$\text{где } F_1(q) = 1 - \frac{1}{\operatorname{ch} \alpha \frac{q}{2}}; \quad F_2(q) = 1 - \frac{1}{\operatorname{ch} \alpha \frac{l - q}{2}}.$$

Задаем закон изменения функции $I_1(q)$

$$I_1(q) = \begin{cases} I_n & 0 \leq q \leq \frac{l}{2} \\ 0 & \frac{l}{2} \leq q \leq l \end{cases} \quad (11)$$

и предполагаем, что $I_1(q)$ является единственной функцией, удовлетворяющей условию (10).

Для доказательства предположим, что внутри интервала $0 \leq q \leq l$ $I_1(q)$ изменяется по любому другому закону, однако таким образом, что $0 < I_1(q) < I_n$. Если функция $I_1(q)$ выбрана правильно, должны выполняться следующие неравенства:

$$[I_n - I_1(q)] \cdot [F_2(q) - F_1(q)] > 0; \quad 0 \leq q < \frac{l}{2}; \quad (12)$$

$$I_1(q) [F_1(q) - F_2(q)] > 0; \quad \frac{l}{2} \leq q \leq l. \quad (13)$$

Действительно, неравенства (11) и (12) выполняются, поскольку в первом случае $I_n > I_1(q)$ и $F_2(q) > F_1(q)$, а во втором случае $F_1(q) > F_2(q)$.

Следовательно, $I_1(q)$ является единственной функцией, удовлетворяющей условию (10).

Аналогичное доказательство может быть проведено при постановке задачи в наиболее общем виде, когда $F_1(q)$ и $F_2(q)$ — любые функции местоположения нагрузки, что может иметь место при более сложной конфигурации рельсовой сети, влиянии смежных участков, влиянии близлежащих металлических сооружений и т. д. В этом случае, очевидно, имеет место следующее равенство:

$$I_1(q) = \begin{cases} I_n & F_1(q) < F_2(q) \\ 0 & F_1(q) > F_2(q) \end{cases} \quad (14)$$

Из предыдущего можно сделать следующие выводы.

1. Наивыгоднейшему режиму соответствует разность потенциалов между отсасывающими пунктами:

$$U_1(q) - U_2(q) = \begin{cases} \frac{r}{\alpha} I_n \operatorname{cth} \alpha q & 0 \leq q \leq \frac{l}{2} \\ \frac{r}{\alpha} I_n \operatorname{cth} \alpha (l - q) & \frac{l}{2} \leq l - q \leq l \end{cases} \quad (14a)$$

Максимальная разность потенциалов между отсасывающими пунктами равна

$$[U_1(q) - U_2(q)]_{\max} = I_n \frac{r}{\alpha} \operatorname{cth} \alpha \frac{l}{2}. \quad (15)$$

Следовательно, наивыгоднейший режим работы отсасывающих пунктов отличается от эквипотенциального при перемещении нагрузки в интервале $0 \leq q \leq l$.

2. Средняя за период разность потенциалов между отсасывающими пунктами равна нулю, т. е. в среднем за период поддерживается эквипотенциальный режим работы отсасывающих пунктов. Действительно,

$$U_1(q) - U_2(q) = \frac{r}{\alpha l} I_n \left[\int_0^l \operatorname{cth} \alpha q \, dq - \int_l^0 \operatorname{cth} \alpha \frac{l - q}{2} \, dq \right] = 0.$$

3. В случае равномерно распределенной нагрузки экстремальное регулирование отсасывающих пунктов соответствует эквипотенциальному режиму.

4. Функция $I_1(q)$ также удовлетворяет условию минимальности суммы потенциалов отсасывающих пунктов во всем интервале $0 \leq q \leq l$ перемещения нагрузки.

$$U_1(q) + U_2(q) = \min. \quad (16)$$

Условие (16) доказывается аналогично вышеприведенному доказательству, так как

$$\operatorname{cth} \alpha q < \operatorname{cth} \alpha (l - q); \quad 0 \leq q \leq \frac{l}{2};$$

$$\operatorname{cth} \alpha q > \operatorname{cth} \alpha (l - q); \quad \frac{l}{2} \leq q \leq l.$$

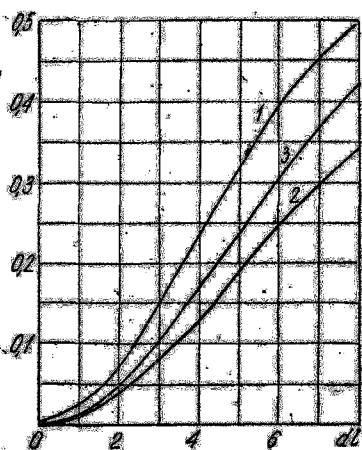


Рис. 3. График зависимости среднего значения тока утечки от параметра рельсовой сети:

1 — сосредоточенная движущаяся нагрузка при эквипотенциальном режиме работы отсасывающих пунктов; 2 — сосредоточенная движущаяся нагрузка при экстремальном регулировании; 3 — равномерно распределенная нагрузка.

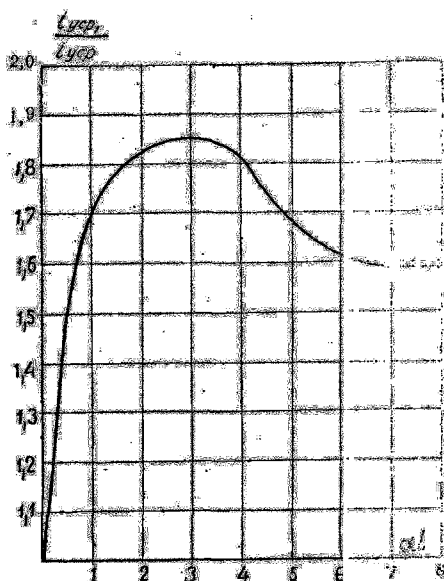


Рис. 4. Зависимость $\frac{I_{ycp}}{I_{ycp}} = f(\alpha l)$.

Данный вывод представляет наибольший практический интерес, ибо позволяет осуществить экстремальное регулирование по минимуму суммы потенциалов отсасывающих пунктов. Среднее за период значение интегрального тока утечки при экстремальном регулировании равно:

$$I_{ycp} = \frac{2I_n}{l} \int_0^{\frac{l}{2}} \left(1 - \frac{1}{\operatorname{ch} \alpha \frac{q}{2}} \right) dq = I_n \left[1 - \frac{8}{\alpha l} \left(\operatorname{arctg} e^{\frac{\alpha l}{4}} - \frac{\pi}{4} \right) \right]. \quad (17)$$

Для сравнения на рис. 3 приведены значения $\frac{I_{ycp}}{I_n} \% = f(\alpha l)$, рассчитанные на основании равенства (17), и значения $\frac{I_{ycp}}{I_n} \% = f(\alpha l)$, приведенные в (1) для случая участка с двухсторонним отсасыванием и эквипотенциальным режимом работы отсасывающих пунктов. На рис. 4 при-

ведена зависимость $\frac{i_{y\text{ ср}}}{i_{y\text{ ср}}} = f(\alpha l)$. Как видно из рисунка, соотношение $\frac{i_{y\text{ ср}}}{i_{y\text{ ср}}}$ во всем диапазоне сохраняется примерно постоянным и равным 1,65—1,85.

В случае нахождения на участке сосредоточенных перемещающихся нагрузок, произвольных по величине, условие (10) записывается в более общем виде:

$$\sum_{i=1}^{i=n} I_{1i}(q) F_{1i}(q) + \sum_{i=1}^{i=n} [I_{ni} - I_{1i}(q)] F_{2i}(q) = \min. \quad (18)$$

Необходимое и достаточное условие выполнения требования (18) соответствует выполнению условия (10) для каждого из слагаемых. Таким образом, проведенное доказательство также справедливо и в случае нахождения на участке произвольного числа сосредоточенных перемещающихся нагрузок. При этом на каждую отдельную нагрузку не накладывается никаких ограничений, т. е. её величина в интервале $0 \leq q \leq l$ может изменяться по произвольному закону.

Токи отсасывающих пунктов в этом случае

$$I_1(q) = \sum_{i=1}^{i=k} I_{ni}; \quad I_2(q) = \sum_{i=k}^{i=n-k} I_{ni}. \quad (19)$$

Здесь k — число нагрузок, расположенных в интервале, где имеет место неравенство $F_{1i}(q) < F_{2i}(q)$, что соответствует в нашем случае $0 \leq q \leq \frac{l}{2}$.

Условие минимальности суммы потенциалов на концах участка в случае произвольного числа нагрузок и экстремального регулирования также сохраняет силу и записывается в следующем виде:

$$\sum_{i=1}^{i=n} U_{1i}(q) + \sum_{i=1}^{i=n} U_{2i}(q) = \min. \quad (20)$$

Приведенные исследования свидетельствуют о необходимости экстремального регулирования отсасывающих пунктов трамвая, что позволяет значительно снизить токи утечки.

Критерием экстремального регулирования является минимальность суммы потенциалов отсасывающих пунктов.

ВЫВОДЫ

1. Эквипотенциальный режим работы отсасывающих пунктов является усредненным критерием и не соответствует минимальности токов утечки с участка рельсовой сети.

2. Наименьшему значению тока утечки соответствует экстремальное регулирование по минимальности суммы потенциалов отсасывающих пунктов.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. В. Стрижевский. Теория и расчет дренажной и катодной защиты магистральных трубопроводов от коррозии блуждающими токами. Гостехиздат, 1963.
2. В. М. Левин, И. С. Оганезова, М. В. Тариевский. Схема автоматического регулирования потенциалов отсасывающих пунктов трамвая. Сб. научных работ АКХ им. К. Д. Памфилова, вып. IV. Защита подземных сооружений от коррозии, № 2, 1960.
3. Правила защиты подземных металлических сооружений от коррозии СН28—58.