

УДК 621.316.176:621.3.019.3

РАСЧЕТ ПО НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАЗРАБОТКАХ

В. И. Бочаров

Чтобы принять наиболее надежный вариант карьерной распределительной сети (КРС), необходимо прежде всего рассчитать уровни надежности.

Как показал анализ материалов аварийной статистики по карьерам (рассмотрено 14 858 случаев повреждений КРС), существует линейная зависимость между повреждаемостью отдельных элементов схемы и числом однородных элементов. Так, например, повреждаемость гибких экскаваторных кабелей описывается уравнением

$$x_{э.к} = 134 + 3,09 (n_{э} - 29,5), \quad (1)$$

где $x_{э.к}$ — число повреждений экскаваторного кабеля в год; $n_{э}$ — число экскаваторов на карьере.

Принимаем в качестве характеристической случайной величины X : $X = 1$, если повреждение элемента КРС произошло; $X = 0$, если повреждения не произошло. Тогда частота появления повреждения в каждом из n независимых опытов (за продолжительность опыта принимается промежуток времени, в котором появляется не более одного повреждения данного элемента) определится по формуле [Вентцель, 1964; Бочаров, 1965]

$$P_{э}^* = \frac{\sum_{i=1}^n X_{it}}{N_{э} T}, \quad (2)$$

где t — продолжительность опыта (на практике — сутки); T — период наблюдения (на практике 300—360 суток); $N_{э}$ — число однотипных наблюдаемых элементов; X_i — наблюдаемое значение характеристической величины X .

Согласно теореме Бернулли, при неограниченном увеличении числа опытов $n = T/t$ частота появления события P^* (повреждаемости) может быть принята за вероятность P появления события в отдельном опыте. Обработка материалов 14 858 случаев повреждения современными методами математической статистики позволила определить повреждаемость отдельных элементов карьерной сети по трем районам рудных карьеров.

Обработка материалов аварийной статистики произведена следующим образом. Когда

$$nP > 4^x,$$

$$nq > 4^x$$

(P и q — соответственно заданная вероятность и надежность элемента схемы) допускаем, что частота P_3^* есть случайная величина, распределение которой близко к нормальному [Вентцель, 1964]. Тогда, назначив доверительную вероятность β , определяем такой интервал

$$(P - \epsilon_\beta; P + \epsilon_\beta),$$

чтобы величина P_3^* попадала в этот интервал с вероятностью β

$$P(|P_3^* - P| < \epsilon_\beta) = \Phi\left(\frac{\epsilon_\beta}{\sigma_{P^*} \sqrt{2}}\right) = \beta, \quad (3)$$

где ϵ_β — погрешность; σ_{P^*} — дисперсия; $\frac{\epsilon_\beta}{\sigma_{P^*} \sqrt{2}} = \Phi^{-1}(\beta)$ функция, обратная функции Лапласа.

Когда распределение случайной величины не соответствует условию (3), доверительные интервалы строим, исходя из биномиального закона распределения.

Добротность полученных материалов $\Phi(x) = 0,85 \div 0,8$, погрешность отклонений от средних значений, приведенных в таблице $\epsilon\% = \pm 10 \div 15\%$. Обработка материалов аварийной статистики показала, что распределение повреждаемости отдельных элементов КРС во времени может быть описано по закону редких событий Пуассона. Чем больше объем наблюдения, тем с большей уверенностью можно принять

$$P_3^* = P_3.$$

Многолетние наблюдения за КРС показали, что частота повреждения карьерной сети меняется как в течение суток, так и в течение года. Таким образом,

$$P_i^* = P_1^* + P_2^* \exp^{-\frac{(t_i - t_2)^2}{\alpha}} \quad (4)$$

где P_i^* — частота повреждения КРС в i -й интервал наблюдения; P_1^* и P_2^* — частота повреждения КРС в интервал наблюдения, соответственно, не зависящая и максимальная зависящая от времени наблюдения; t_i — интервал (всего 12 интервалов) наблюдения; t_2 — интервал наблюдения, в котором наблюдается максимальное значение переменной составляющей частоты повреждения; α — расчетный коэффициент (см. таблицу).

Определив по горнотехнологическим факторам возможные варианты карьерной сети [Алаторцев, 1949], перейдем к предварительному электрическому расчету, а затем к расчету карьерной сети по надежности.

Если условия возникновения повреждений элементов КРС в каждом опыте одинаковы, вероятность хотя бы одного отключения электроприемника, получающего питание по фронтально-продольной линии, определится по формуле

$$P_{(\Phi \Pi) i} = 1 - \prod_{i=1}^n \bar{P}_i, \quad (5)$$

где $\bar{P}_i$ — надежность i -го электрически связанного элемента схемы.

Характер повреждений электроустановок

Вид повреждения	P_1	P_2		α
Северные районы				
Многофазные короткие замыкания, зависящие от времени года	0,037	0,191	3	1,49
Устойчивые однофазные замыкания	0,057	0,082	7,5	10,5
Кратковременные однофазные замыкания	0,0512	0,126	7,7	4,5
Различные в течение суток	0,055	0,138	11	9,3
Южные районы				
Суммарные повреждения в течение года	0,062	0,0686	12	2,4

Математическое ожидание числа повреждений в опыте

$$m_{(\Phi \Pi) i} = \sum_{i=1}^n P_i. \quad (6)$$

Зная вероятность повреждения (для выбранного варианта схемы) в каждом опыте, можно определить вероятность появления хотя бы одного повреждения в N опытах [Вентцель, 1964]. Зная ожидаемое число повреждений в каждом опыте, подсчитаем ожидаемое число повреждений в N опытах

$$m_N = \sum_{i=1}^N m_i, \quad (7)$$

где m_i — ожидаемое число повреждений в i -м опыте.

Определим надежность бесперебойного питания электроприемника, подключенного к сложной сети, с учетом надежного действия защиты

$$\bar{P}_k = \prod_{i=1}^k \bar{P}_i \prod_{j=1}^{n-k} \bar{P}_j, \quad (8)$$

где $\bar{P}_k$ — надежность электроснабжения k -го электроприемника; $\bar{P}_i$ — надежность i -го электрически связанного элемента схемы (от k -го электроприемника до шин подстанции); $\bar{P}_j$ — надежность j -го электроприемника, имеющего в месте подключения защиту,

$$\bar{P}_j = (1 - \bar{P}_j P_{\text{заш}}),$$

$P_{\text{заш}}$ — вероятность неуспешного действия защиты, при $P_{\text{заш}} = 1$ защита действует неуспешно, при $P_{\text{заш}} = 0$ защита действует успешно,

$$P_{\text{заш}} = (1 - \bar{P}_{\text{заш}}).$$

Надежность действия защиты

$$\bar{P}_{\text{заш}} = 1 - (1 - \bar{P}_{\text{изб}} \bar{P}_{\text{эк}}),$$

где $\bar{P}_{\text{изб}}$ — надежность действия защиты по избирательному признаку; $\bar{P}_{\text{эк}}$ — эксплуатационная надежность защиты (способность защиты вы-

полнять свои функции при заданном числе перемещений по территории карьера).

Если математическое ожидание числа повреждений можно определить по формуле (6) или (7), то ожидаемое число простоев k -го электроприемника в опыте

$$m_k = \sum_{i=1}^k P_i + \sum_{j=1}^{n-k} P_j P_{\text{заш}}, \quad (9)$$

где $\sum_{i=1}^k P_i$ — математическое ожидание числа повреждений электрически связанных элементов от k -го электроприемника до шин подстанции участников, не имеющих защиты; $\sum_{j=1}^{n-k} P_j$ $P_{\text{заш}}$ — математическое ожидание числа повреждений в участках схемы, подключенных к общей сети с учетом надежного действия защиты, установленной в местах подключения.

Надежность бесперебойного питания k -го электроприемника, с учетом успешного действия автоматического повторного включения АПВ,

$$\bar{P}_{k, \text{АПВ}} = 1 - \bar{P}_k P_{\text{АПВ}}, \quad (10)$$

где $\bar{P}_k = 1 - \bar{P}_k$ — вероятность перерыва питания k -го электроприемника по формуле (8); $P_{\text{АПВ}}$ — вероятность неуспешного действия автоматического повторного включения, при $P_{\text{АПВ}} = 1$ АПВ действует неуспешно, при $P_{\text{АПВ}} = 0$ АПВ действует успешно.

Математическое ожидание числа перерывов k -го электроприемника в опыте при наличии АПВ

$$m_{\text{АПВ}} = m_k P_{\text{АПВ}}. \quad (11)$$

Определив надежность карьерной сети в период эксплуатации, необходимо рассчитать условия обеспечения минимума простоя электроприемников с учетом повреждений в подготовительный период (при взрывных работах на уступах). Для этого необходимо рассчитать вероятностную сетку поражения элементов КРС осколками взорванной массы.

Показателем выполнения заданной производительности карьера обычно служит скорость подвигания фронта горных работ [Алаторцев, 1949]

$$v_{\text{ф}} = \frac{v_{\text{заб}} \text{Ш}_{\text{бл}}}{L_{\text{ф.у}}}, \quad (12)$$

где $v_{\text{заб}}$ — скорость подвигания забоя; $\text{Ш}_{\text{бл}}$ — ширина блока; $L_{\text{ф.у}}$ — заданная длина фронта (блока, участка).

Скорость подвигания забоя пропорциональна производительности экскаватора

$$v_{\text{заб.т}} = K Q_{\text{э.т}} \frac{T_{\text{п}}}{T_{\text{п}} + (T_{\text{пр}} + T_{\text{ав}}) \gamma}, \quad (13)$$

где K — коэффициент пропорциональности; $Q_{\text{э.т}}$ — теоретическая производительность экскаватора; $T_{\text{п}}$ — полезное время; $T_{\text{пр}}$ — время, необходимое для организации производственного процесса; $T_{\text{ав}}$ — вероятностное время аварийного простоя; γ — коэффициент эффективности использования счетнорешающих устройств по управлению транспортом на карьере.

Вероятностное время аварийного простоя $T_{ав}$ k -го электроприемника можно определить по формуле

$$T_{ав. k} = t_{поиск} + m_k t_k, \quad (14)$$

где $t_{поиск}$ — время, необходимое для определения места повреждения в схеме; m_k — математическое ожидание числа простоев электроприемника — см. (6), (7), (9), (11); t_k — продолжительность ремонта поврежденных элементов.

Так как скорость подвигания фронта работ пропорциональна производительности карьера, изменяя $T_{ав}$, получим разность недоотпущенной продукции

$$\Delta C = Y_1 = C_{зад} - C_{фак.}, \quad (15)$$

где Y_1 — стоимость недоотпущенной продукции, вызванная простоем электроприемников из-за повреждений в системе КРС; $C_{зад}$ — заданная по плану стоимость выработанной продукции; $C_{фак.}$ — фактическая стоимость выработанной продукции с учетом простоя.

Вторая составляющая ущерба, вызванного повреждением в карьерной сети, — стоимость простоя электроприемников и других механизмов или агрегатов, которую можно определить по формуле

$$Y_2 = \sum_{i=1}^n T_i a_i, \quad (16)$$

где T_i — продолжительность простоя i -го электроприемника или механизма, связанного в единую технологическую цепочку; a_i — стоимость 1 ч простоя i -го потребителя или механизма (экскаватора, буровых установок и т. п.).

Определив ущерб для данного опыта, подсчитываем ущерб для промежутка времени T (например, за месяц, год и т. д.)

$$Y_T = \sum_{i=1}^n (Y_1 + Y_2)_i, \quad (17)$$

где Y_T — ущерб, вызванный недоотпуском продукции и простоя механизмов и электроприемников за промежуток времени T .

При изменении конфигурации или дополнении схемы средствами автоматики и защиты одновременно и зависимо будет меняться стоимость схемы и $T_{ав}$ (14). Так как экономичность схемы определяется расчетными затратами [Миллер, 1965], переходя от одного варианта схемы к другому, получим

$$Y_4 = \Delta Z = Z_1 - Z_2, \quad (18)$$

где $Y_4 = \Delta Z$ — дополнительные затраты при изменении варианта схемы; Z_1 ; Z_2 — расчетные затраты соответственно по первому и второму вариантам.

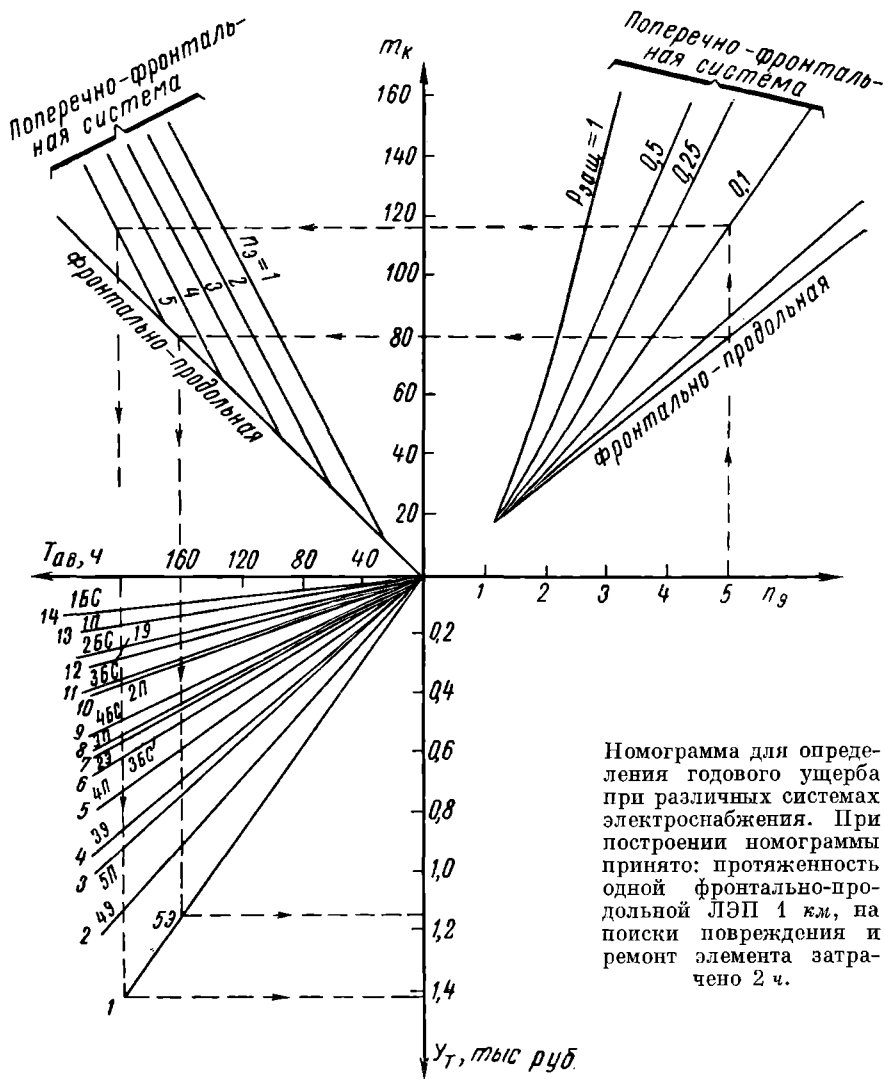
Решая совместно уравнения (17) и (18) методами минимизации, найдем оптимальный вариант системы распределения электрической энергии на карьере для заданного срока наблюдения T

$$Y_T + Y_4 = \min. \quad (19)$$

Если на карьере или около обогатительной фабрики предусмотрены аварийные склады с рудой, оптимальные затраты, определяющие надеж-

ность карьерной сети, можно определить, решая совместно методом минимизации уравнения (16) и (17)

$$Y_4 + \sum_{i=1}^n (Y_2)_i = \min. \quad (20)$$



Рассмотрим конкретный пример расчета двух вариантов карьерной сети по надежности. Предположим, протяженность одной карьерной линии $l_{\text{КРС}} = 1 \text{ км}$, на поиск повреждения и ремонт затрачивается 2 ч. Система развития фронта горных работ — параллельная. Таким образом, можно принять фронтально-продольную или поперечно-фронтальную систему распределения электрической энергии на карьере [Алаторцев, 1949]. Примем стоимость простоя за 1 ч (средние данные), руб/ч: экскаватора 14; бурового станка БС-1 — 6,25; бурового станка П-25 — 9,4.

Воспользовавшись формулами (5) — (20) и материалами аварийной статистики, найдем ожидаемое число случаев повреждения и ожидаемый ущерб от простоев. Решение примера приведено на рисунке, откуда видно, что при наличии на карьере 5 экскаваторов ожидаемый ежегодный ущерб для фронтально-продольного варианта 1,15 тыс. руб., для поперечно-фронтальной системы при надежной защите, $P_{\text{защ}} = 0$, ущерб равен 1,2 тыс. руб., при $P_{\text{защ}} = 0,1$ ущерб достигает 1,42 тыс. руб. в год.

Для окончательного выбора варианта карьерной сети необходимо учесть ежегодные затраты на сооружение и эксплуатацию КРС. В приведенном примере ежегодные затраты при $P_{\text{защ}} < 0,1$ для поперечно-фронтальной системы на 0,7 тыс. руб. меньше.

Таким образом, предлагаемый метод позволяет построить надежные научно-обоснованные системы КРС с учетом конкретных специфических особенностей производственного процесса.

ЛИТЕРАТУРА

А л а т о р ц е в С. А. Классификация рудничных энергораспределительных систем и устройств на открытых разработках. Зап. Ин-та горной механики АН СССР, № 8, 1949.

Б о ч а р о в В. И. К вопросу выбора схем электроснабжения промпредприятий. Тр. Фрунз. политехн. ин-та, вып. 6, 1962.

Б о ч а р о в В. И. Статистический метод определения надежности систем распределения электрической энергии на открытых горных разработках. Электричество, № 4, 1965.

В е н т ц е л ь Е. С. Введение в исследование операций. Советское радио, 1964.

М и л л е р Г. Р. Вопросы надежности в системах электроснабжения промпредприятий. Промышленная энергетика, № 1, 1965.
