

УДК 621.315.1

В.Н. АЛЕКСАНДРОВ, инженер,  
Е.П. ЗАБЕЛЛО, канд. техн. наук (БелЭНИН)

## ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТЕЙ РАЗЛИЧНЫХ СОСТОЯНИЙ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Широкое применение вычислительной техники при организации обслуживания электрических сетей позволяет решать ряд задач, решение которых ранее было затруднительно из-за больших объемов вычислений. По этой же причине оказывались неиспользованными, например, ряд методик оценки надежности электрических сетей. Если детально учитывать технические причины повреждаемости элементов сетей и при этом проводить более глубокое дробление линии на элементы, то обоснованно можно выбирать наиболее слабые узлы сетей и намечать мероприятия по увеличению их надежности.

Различный срок службы элементов одной и той же воздушной линии (ВЛ) и различные условия ее эксплуатации приводят к дифференцированному подходу при определении надежности этих линий. А так как эта оценка проводится для достаточно коротких промежутков времени до наступления износовых отказов, то вероятность любого состояния элемента ВЛ в будущем не зависит от состояния его в настоящее время и от того, каким образом элемент пришел в это состояние, т.е. в данном случае применима теория марковских процессов [1] при незначительных допущениях.

1. Интенсивности потоков отказов ( $\lambda$ ) и восстановлений ( $\mu$ ) считаются постоянными в рамках рассматриваемого периода времени и изменяются только при переводе к новому интервалу времени с целью учета сезона и старения объекта;

2. Отказы элементов ВЛ (отдельных блоков) являются событиями независимыми и несвязанными;

3. Вероятность нахождения  $i$ -го элемента в отключенном состоянии определяется только интенсивностями потоков отказов и восстановлений, что вполне адекватно рассматриваемому промежутку времени.

4. Режим отключенного состояния линии по причине планового ремонта не рассматривается, т.е. считаем, что  $j$ -я совокупность однородных элементов может находиться в одном из двух состояний:

а) нормальная работа ( $N$ ) ; б) отказ по причине потери электрической или механической прочности.

Рассмотрим объекты следующих видов: а) одноцепные ВЛ без троса; б) то же с тросом; в) двухцепные ВЛ с двумя тросами.

Граф состояний для первого случая представлен на рис. 1, а и имеет следующие состояния: 1, 2, 3, ... , 13 — состояния отказа изоляции, провода, комбинации состояний отказов по причине электрических повреждений проводов фаз  $A, B, C$  ( $A \bar{B} C, \bar{A} B C, \dots, A \bar{B} \bar{C}$ ) ... , отказ опор.

Тогда система дифференциальных уравнений Колмогорова для системы с таким графом переходов будет иметь вид:



вероятности переходов в одно из состояний;  $L$  – количество состояний отказа;  $M = L + 1$  – полное количество состояний.

Получить общее аналитическое решение системы дифференциальных уравнений (1) для  $M$  состояний сложно. Поэтому решим систему при  $\mu_s = 0$ ,  $s = \bar{1}, L$  и при начальных условиях  $P_N(0) = 1$ ,  $P_s(0) = 0$ . В этом случае вероятность нахождения ВЛ во включенном состоянии в любой момент времени  $t$  периода  $\Delta t$  будет равна

$$P_N = \exp(-\lambda_1 - \lambda_2 - \dots - \lambda_L) t, \quad (2)$$

а в  $i$ -ом состоянии

$$P_i = \frac{\lambda_i}{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_L} [1 - \exp(-\sum_{s=1}^L \lambda_s) t].$$

Воздушная линия представляет собой систему последовательно соединенных элементов в смысле надежности и, согласно [2], отказы такой системы образуют пуассоновский поток, равный сумме потоков отказов входящих в группу элементов. Следовательно,

$$\lambda_i = \sum_{l=1}^n \sum_{\nu=1}^{x_l} \lambda_{l\nu i},$$

где  $x_l$  – объем группы однородных элементов с одинаковым износом;  $n$  – количество этих групп.

Рассмотрим пример.

Найдем вероятность отключения ВЛ 35 кВ на деревянных опорах по причине отказа хотя бы одной опоры в зимний период, если ВЛ содержит 300 опор, и на основе обработки информации о дефектах установлено, что 250 опор ( $\lambda_K = 0,00025$ ) имеют поток  $\lambda_{\Sigma K} = 0,0625$ ; 30 опор ( $\lambda_K = 0,00035$ ) –  $\lambda_{\Sigma K} = 0,0105$ ; 20 опор ( $\lambda_K = 0,00045$ ) –  $\lambda_{\Sigma K} = 0,009$ ,  $\lambda_{\Sigma i} = 0,082$ , что составляет 45 % от общего потока отказов  $\lambda_3 = 0,182$  в зимний период. Согласно (2), при  $t = 1$

$$P_{0n} = 0,45 [1 - \exp^{-0,182}] = 0,0765.$$

Граф переходов восстанавливаемой системы для одноцепной ВЛ с тросом показан на рис. 1,б. Состояние  $N_1$  – состояние отказа троса.

Система дифференциальных уравнений для этого случая будет иметь вид:

$$\left. \begin{aligned} P_N' &= -P_N \left( \sum_{s=1}^L \lambda_s + \lambda_{NN_1} \right) + \sum_{s=1}^L P_s \mu_s + P_{N_1} \mu_{NN_1}; \\ P_{N_1}' &= P_N \lambda_{NN_1} - P_N \left( \sum_{s=1}^L \lambda_s' + \mu_{NN_1} \right) + \sum_{s=1}^L P_s \mu_s; \\ P_1' &= P_N \lambda_1 + P_{N_1} \lambda_1' - P_1 (\mu_1 + \mu_1'); \\ &\dots \end{aligned} \right\}$$

$$P_L^i = P_N \lambda_L + P_{N_1} \lambda_L' - P_L (\mu_L + \mu_L').$$

где  $\lambda_{NN_1}$  — интенсивность отказов троса. (Обозначения состояний соответствуют предыдущему случаю).

Учет сезонности оценки может существенно упростить вид графа (рис. 1, б), так как зимой, например,  $\lambda_{NN_1} \approx 0$ .

Детальный учет состояний отказа для двухцепной линии с двумя тросами приводит к резкому усложнению графа состояний (рис. 1, в). На графе ОП — состояние отказа опоры; 1, 3, 5, 7 — состояние отказа правой цепи: без учета влияния повреждения тросов, отказа троса (левого троса), правого троса, обоих тросов; 2, 4, 6, 8 — то же при отказе левой цепи; ОО — состояние отказа ВЛ (без учета состояния отказа опор);  $N_1, N_2, N_3$  — состояния отказа троса (левого), правого, обоих.

Составляем систему дифференциальных уравнений для общего случая:

$$\left. \begin{aligned} P_N^i &= -P_N (\lambda_{оп} + \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_{N_1 O} + \lambda_{NO} + \Lambda^i + \Lambda'' + \Lambda''') + \\ &+ P_{оп} \mu_{оп} + \sum_{j=1}^3 P_{N_j} \Lambda^j + \sum_{j=1}^2 P_j \mu_j + P_{OO} \mu_{NO}; \\ P_{N_1}^i &= P_N \Lambda''' - P_{N_1} (\Lambda^3 + \Lambda^{IV} + \lambda_3 + \lambda_2 + \lambda_{N_1 O}) + P_{N_3} \Lambda^4 + \\ &+ P_3 \mu_3 + P_4 \mu_2 + P_{OO} \mu_{N_1 O}; \\ P_{N_2}^i &= P_N \Lambda'' - P_{N_2} (\Lambda^2 + \Lambda^V + \lambda_{N_2 O} + \lambda_1 + \lambda_4) + P_{N_3} \Lambda^5 + P_5 \mu_1 + \\ &+ P_6 \mu_4 + P_{OO} \mu_{N_2 O}; \\ P_{N_3}^i &= P_N \Lambda^i + P_{N_1} \Lambda^{IV} + P_{N_2} \Lambda^V - P_{N_3} (\Lambda^5 + \Lambda^1 + \Lambda^4 + \lambda_5 + \lambda_6 + \\ &+ \lambda_{N_3 O}) + P_7 \mu_5 + P_8 \mu_6 + P_{OO} \mu_{N_3 O}; \\ P_1^i &= P_N \lambda_1 - P_1 (\mu_1 + \lambda_2) + P_{OO} \mu_5; \\ &\dots \\ &\dots \\ P_8^i &= P_{N_3} \lambda_6 - P_8 (\mu_6 + \lambda_5) + P_{OO} \mu_5; \\ P_{оп}^i &= P_N \lambda_{оп} - P_{оп} \mu_{оп}; \end{aligned} \right\}$$

$$P_{OO}^I = P_N \lambda_{NO} + P_{N_1} \lambda_{N_1O} + P_{N_2} \lambda_{N_2O} + P_{N_3} \lambda_{N_3O} + \lambda_2 P_1 + \lambda_1 P_2 + \lambda_3 P_4 + \lambda_4 P_5 + \lambda_1 P_6 + \lambda_6 P_7 + \lambda_5 P_8 - P_{OO} (2 \mu_2 + 2 \mu_1 + \sum_{i=3}^6 \mu_i + \mu'_{NO} + \sum_{j=1}^3 \mu_{N_jO})$$

Решение систем дифференциальных уравнений для рассмотренных случаев осуществляется с помощью стандартных программ.

Разработанная в БелЭНИИ система сбора и обработки информации о дефектах позволяет на основе формализованного документа "Ведомость дефектов" накапливать сведения о техническом состоянии, получать показатели надежности ЛЭП.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вентцель Е.С. Исследование операций. — М.: Советское радио, 1972. — 552 с.
2. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности. — М.: Наука, 1965. — 524 с.

УДК 621.316

М.А. КОРОТКЕВИЧ, канд. техн. наук,  
САНТЬЯГО ЛАХЕС ЧОЙ, инженер (БПИ)

#### К ОЦЕНКЕ УДЕЛЬНОЙ СТОИМОСТИ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Принципиально важное значение при проектировании и эксплуатации электрических систем и сетей имеет правильно установленная величина удельной стоимости потерь электроэнергии. В последние годы этому вопросу было уделено достаточно большое внимание. Однако представляет интерес определение стоимости 1 кВт·ч потерянной электроэнергии для энергосистемы, работающей в условиях тропического климата со специфическим графиком нагрузки.

Электроэнергия, теряемая в отдельных элементах электрической системы, должна быть выработана на электростанциях и передана к месту потерь. Поэтому при оценке потерь необходимо учитывать затраты на производство и передачу потерь электроэнергии.

Ранее стоимость потерь электроэнергии определяли по тарифу на электроэнергию; по топливной части станционной составляющей; по себестоимости производства электроэнергии.

Недостатки этих методов общеизвестны.

В настоящее время [1] стоимость 1 кВт·ч потерянной электроэнергии оценивается исходя из следующих положений:

— при рассмотрении схемы электроснабжения (т.е. электрической системы в целом) затраты на покрытие потерь энергии в системе следует оценивать так же, как и на полезно используемую энергию;