

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА БЕЙЕСА ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ НАДЕЖНОСТИ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ БОЛЬШОЙ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ

Процесс эксплуатации линий с большой пропускной способностью (криогенных кабелей) непременно будет связан с устранением возникающих отказов его отдельных элементов по различным причинам [1].

Целью данной работы является прогнозирование с использованием метода Бейеса [2] состояния криогенных кабельных линий (ККЛ) при предполагаемых условиях его эксплуатации (на примере сверхпроводящего кабеля (СПК)).

ККЛ относится к таким видам современных технических устройств, которые находятся еще в стадии разработки, и делать выводы об их надежности на основании информации об эксплуатационных отказах не представляется возможным. В этом случае целесообразно рассматривать надежность на основании оптимистически предполагаемой статистики об отказах СПК, но не с точки зрения их регистрации при перспективной эксплуатации, а с точки зрения прогнозирования вероятностного состояния исследуемых признаков (отказов) кабеля.

Теоретически и практически возможных отказов ККЛ большое множество, но проанализировать все их в этой работе не представляется возможным. Поэтому для упрощения процесса применения метода Бейеса при прогнозировании надежности СПК мы остановимся только на трех признаках отказов:

- 1) X_1 — повышение рабочей температуры сверхпроводника выше критической ($T_{раб} > T_K$);
- 2) X_2 — нарушение электроизоляции;
- 3) X_3 — увеличение времени выхода СПК на рабочий режим более чем на 1–2 ч.

Предположим, например, что появление этих признаков связано с одним из следующих факторов: а) с возникшей неисправностью в ожигательно-рефрижераторной системе (состояние A_1); б) с ухудшением качества электроизоляции (состояние A_2); в) с нарушением вакуумной системы криостата (состояние A_3).

Перечисленные факторы в свою очередь могут иметь место при соответствующих механических, теплофизических, строительно-технологических или эксплуатационных отказах СПК.

При нормальном функционировании СПК (состояние A_4) признаки отказов X_1 и X_2 не наблюдаются, а признак X_3 имеет место, например, только в 7% случаев.

На основании предполагаемых статистических данных допустим, что в течение всего исследуемого времени имеем: 94%-ную долю времени нормального функционирования кабеля (A_4), а 3; 1 и 2%-кабель имеет соответственно состояние A_1 , A_2 и A_3 . Известно также, что наличие признаков \bar{X}_1 , \bar{X}_2 , \bar{X}_3 , зафиксированных в n %-ных случаях при различных состояниях СПК, и их отсутствие (X_1 , X_2 и X_3) приведены в диагностической табл. 1.

Из [2] известно, что отсутствие рассматриваемого признака \bar{X}_1 есть наличие противоположного события X_1 . Вероятность признаков отказов СПК, определяемая из соотношения (1), представлена в табл. 1.

$$P(\bar{X}_i/A_i) = 1 - P(X_i/A_i). \quad (1)$$

При дальнейшем исследовании и анализе сначала определяются вероятности состояний СПК при предположении, что в условиях эксплуатации зафиксированы все три признака X_1 , X_2 и X_3 . В этом случае считаем, что признаки отказов – независимые события. Для расчета воспользуемся обобщенной формулой Байеса

$$P(A_i/K_*) = P(A_i)P(K_*/A_i) / \sum_{i=1}^n P(A_i)P(K_*/A_i), \quad (2)$$

где K_* – комплекс признаков отказов исследуемого криогенного кабеля; $i = 1, 2, 3, \dots, n$ – количество рассматриваемых состояний СПК.

Т а б л и ц а 1. Вероятности признаков отказов и априорные вероятности их состояний

A_i	$P(X_1/A_i)$	$P(\bar{X}_1/A_i)$	$P(X_2/A_i)$	$P(\bar{X}_2/A_i)$	$P(X_3/A_i)$	$P(\bar{X}_3/A_i)$	$P(A_i)$
A_1	0,05	0,95	0,02	0,98	0,03	0,97	0,03
A_2	0,01	0,99	0,10	0,90	0,02	0,98	0,01
A_3	0,00	1,00	0,05	0,95	0,10	0,90	0,02
A_4	0,00	1,00	0,00	1,00	0,07	0,93	0,94

Т а б л и ц а 2. Вероятности состояний СПК при противоположных событиях исследуемых признаков

	\bar{X}_1		\bar{X}_1 и \bar{X}_2		\bar{X}_1, \bar{X}_2 и \bar{X}_3
$P(A_1/B)$	0,125	$P(A_1/C)$	0,012	$P(A_1/D)$	0,030
$P(A_2/B)$	0,145	$P(A_2/C)$	0,002	$P(A_2/D)$	0,009
$P(A_3/B)$	0,730	$P(A_3/C)$	0,028	$P(A_3/D)$	0,018
$P(A_4/B)$	0,00	$P(A_4/C)$	0,958	$P(A_4/D)$	0,943

Результаты определения вероятности состояний СПК по (2) при использовании данных табл. 1 представлены так: $P(A_1/X_1X_2X_3) = 0,8182$; $P(A_2/X_1X_2X_3) = 0,1818$; $P(A_3/X_1X_2X_3) = 0$; $P(A_4/X_1X_2X_3) = 0$.

Далее определяются вероятности состояний СПК при условии, что отсутствуют признаки X_1 ; X_1 и X_2 или X_1 , X_2 и X_3 , но при наличии соответственно X_2 и X_3 ; X_3 .

Результаты исследованных состояний СПК по (2) приведены в табл.2, где логические операции рассмотренных признаков отказов представлены в виде соотношений

$$\bar{X}_1 \wedge X_2 \wedge X_3 = B; \quad \bar{X}_1 \wedge \bar{X}_2 \wedge X_3 = C; \quad \bar{X}_1 \wedge \bar{X}_2 \wedge \bar{X}_3 = D. \quad (3)$$

Таким образом, из проведенного исследования и расчета по (2) видно, что вероятности состояний A_1 , A_2 и A_3 (табл. 2) не равны нулю. Это объясняется тем, что рассматриваемые признаки отказов X_1 , X_2 и X_3 не являются для анализируемых состояний криокабеля определяющими.

Приведенные расчеты показывают, что при одновременном наличии признаков X_1 , X_2 и X_3 криокабель имеет состояние A_1 с вероятностью 0,8182 (неисправность в ожигательно-рефрижераторной системе), а состояние A_2 — лишь только с вероятностью 0,1818 (ухудшение качества электроизоляции).

При отсутствии одного признака X_1 и наличии X_2 и X_3 вероятности состояний A_1 и A_2 почти одинаковы (0,125 и 0,145), а наиболее вероятным для исследуемой СПК линии является состояние A_3 (0,73), т.е. нарушение вакуумной системы криогенного кабеля из-за технологических или эксплуатационных отказов.

При отсутствии двух признаков отказов \bar{X}_1 и \bar{X}_2 или всех трех (\bar{X}_1 , \bar{X}_2 и \bar{X}_3 , табл. 2), как и следовало предполагать, для криогенной кабельной линии электропередачи наиболее вероятнее ее нормальное состояние A_4 , что и подтвердилось проведенным расчетом ($P(A_4/\bar{X}_1 \wedge \bar{X}_2 \wedge X_3) = 0,958$; $P(A_4/\bar{X}_1 \wedge \bar{X}_2 \wedge \bar{X}_3) = 0,943$) по формуле

$$P(A_4/\bar{X}_1 \wedge \bar{X}_2 \wedge X_3) = \frac{P(A_4)P(\bar{X}_1/A_4)P(\bar{X}_2/A_4)P(X_3/A_4)}{\sum_{i=1}^4 P(A_i)L + P(A_2)M + P(A_3)N + P(A_4)Q}, \quad (4)$$

где соответственно $L = P(\bar{X}_1/A_1)P(\bar{X}_2/A_1)P(X_3/A_1)$; $M = P(\bar{X}_1/A_2)P(\bar{X}_2/A_2) \times P(X_3/A_2)$; $N = P(\bar{X}_1/A_3)P(\bar{X}_2/A_3)P(X_3/A_3)$; $Q = P(\bar{X}_1/A_4)P(\bar{X}_2/A_4) \times P(X_3/A_4)$.

Л и т е р а т у р а

1. С т у п а к И.А. Методический подход к оценке показателей надежности криогенных кабельных линий. — В сб.: Научные и прикладные проблемы энергетики. Мн., 1979, вып. 6. 2. Математическая энциклопедия. — М., 1977, т. 1 с. 402.