

ОЦЕНКА ДОЛГОВЕЧНОСТИ МАШИН СЕРИИ П

И. А. ВОЛКОМИРСКИЙ, А. Н. НИМИРОВСКИЙ, А. Я. ЦИРУЛИК

(Представлена научным семинаром кафедры электрических машин)

Томский политехнический институт совместно с научно-исследовательским институтом при заводе «Электромашина» проводит исследования надежности и долговечности машин постоянного тока серии П. С этой целью в течение ряда лет в НИИ завода «Электромашина» проводятся ресурсные испытания машин. Испытываются машины разных габаритов с обмотками якоря, выполненными из провода марок ПЭТВ, ПСДКТ и ПЭТКСО.

В табл. 1 даны сведения о наработке каждой машины, марке провода обмотки якоря, причине отказа, где буквы о. я. означают отказ по причине замыкания в обмотке якоря, к — по причине недопустимо большого искрения на коллекторе, з. к. — замыкания в коллекторе и о. к. — обрыва соединения секции обмотки якоря с коллектором.

Таблица 1

№ п.п.	Тип машины	Марка прово- да обмотки якоря	Наработка в часах	Причина отказа
1	П11	ПЭТВ	29900	—
2	П11	»	29900	—
3	П12	»	24990	о.я.
4	П12	»	23500	о.я.
5	П32	»	9113	к.
6	П32	»	35041	—
7	П32	»	13600	о.я.
8	П32	»	4020	о.я.
9	П32	»	6082	к.
10	П32	»	4113	о.я.
11	П32	ПСДКТ	10856	о.я.
12	П42	»	25790	—
13	П42	»	22944	—
14	П42	»	9522	з.к.
15	П51	»	10130	—
16	П52	»	21552	—
17	П52	»	17993	—
18	П62	»	4533	о.я.
19	П62	»	1095	о.я.
20	П62	»	9460	—
21	П42	ПЭТКСО	4400	о.я.
22	П42	»	27228	—
23	П52	»	25552	о.к.
24	П52	»	6024	о.я.
25	П52	»	850	о.я.
26	П52	»	184	о.я.

Очень низкую надежность показали машины с обмоткой якоря, выполненной из провода ПЭТКСО. Из шести машин четыре отказали в первые 6000 часов работы. Это согласуется и с опытом эксплуатации таких машин. Так как завод выпускает в настоящее время в основном машины с обмоткой якоря из провода ПЭТВ и ПСДКТ, то обработку результатов испытаний произведем для этих машин.

Малое количество машин, прошедших испытания, и малая плотность отказов на единицу времени не позволяет получить по данным эксперимента достаточно достоверных сведений об интенсивности отказов λ . Этот параметр рекомендуется вычислять по опытным данным в том случае, когда на достаточно малом интервале времени имеется не менее десяти отказов [1]. Поэтому вычислены значения вероятности безотказной работы $P(t)$ для разных моментов времени, и построены зависимости $P(t)$.

Согласно ГОСТ 13377-67 вероятность безотказной работы вычисляется по формуле

$$P(t) \cong \frac{N(t)}{N}, \quad (1)$$

где

N — число изделий, поставленных на испытания,

$N(t)$ — число изделий, оставшихся работоспособными до конца наработки t .

По этой формуле $P(t)$ для момента времени t можно вычислить в том случае, если все оставшиеся работоспособными машины имеют наработку, не меньшую t . Как видно из табл. 1, для $t > 10000$ часов некоторые работоспособные машины имеют наработку, меньшую выбранных фиксированных значений t . Эти машины дают дополнительную информацию о надежности, и исключение их из числа машин N приведет к занижению оценки надежности. Учесть данные испытаний таких машин можно, если при вычислении $P(t)$ для момента t не отказавшие, но отработавшие менее t машины учесть с весовым коэффициентом, пропорциональным наработке. Исходим из следующего.

Для плана испытаний типа $[N, B, t]$, при котором испытано N изделий в течение времени t , причем отказавшие изделия заменялись новыми, интенсивность отказов определяется по формуле [1]

$$\lambda = \frac{n}{N \cdot t}, \quad (2)$$

где n — число отказавших изделий.

Для плана типа $[N, B, t]$, в котором отказавшие изделия не восстанавливались,

$$\lambda = \frac{n}{S_n}, \quad (3)$$

где S_n — суммарная наработка всех изделий, определяемая по формуле

$$S_n = \sum_{k=1}^n \tau_k + \sum_{i=1}^m t_i + t(N - n - m), \quad (4)$$

где

m — число изделий, имеющих наработку $t_i < t$,

τ_k — наработка k -го изделия из числа отказавших.

Выражение (3) преобразуем к виду

$$\lambda = \frac{n}{t \cdot \frac{S_n}{t}} = \frac{n}{N_s \cdot t}. \quad (5)$$

Здесь N_9 — некоторое эквивалентное количество испытанных машин, определяемое на основании (4) по формуле

$$N_9 = \frac{1}{t} \sum_{k=1}^n \tau_k + \frac{1}{t} \sum_{i=1}^m t_i + (N - n - m), \quad (6)$$

где

$(N - n - m)$ — количество исправных изделий, имеющих наработку не менее t ;

$\frac{1}{t} \sum_{i=1}^m t_i$ — эквивалентное количество исправных изделий, имеющих наработку, меньшую t ;

$\frac{1}{t} \sum_{k=1}^n \tau_k$ — эквивалентное количество изделий, отказавших в интервале времени $0-t$.

Это количество меньше действительного числа отказавших изделий n . Целесообразно принять в расчет истинное количество отказавших изделий, чтобы не завышать показатели надежности. Тогда эквивалентное количество испытанных в течение времени t изделий в случае, когда часть изделий из числа исправных имеет наработку, меньшую t , следует определять по формуле

$$N_9(t) = n + \frac{1}{t} \sum_{i=1}^m t_i + (N - n - m). \quad (7)$$

Тогда вероятность безотказной работы для любого момента времени t определится по формуле

$$P(t) \cong \frac{N_9(t) - n}{N_9(t)}. \quad (8)$$

По формулам (7) и (8) вычислены значения $P(t)$ различных моментов времени. На рис. 1 показаны зависимости $P(t)$ для машин с витковой

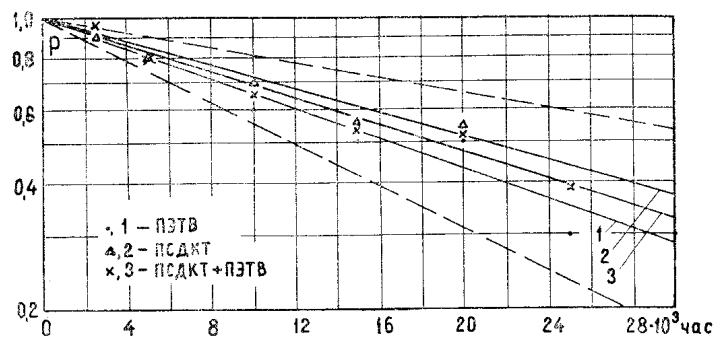


Рис. 1. Функция вероятности безотказной работы машин серии П 1—6 габаритов

изоляции обмотки якоря типа ПЭТВ (кривая 1), ПСДКТ (кривая 2) и для всех машин вместе (кривая 3). На рис. 2 даны зависимости $P(t)$ для якорных обмоток обеих марок обмоточного провода и для всех машин вместе. При определении этих зависимостей отказы по причинам, не связанным с отказом обмоток, не учитывались. На полулогарифмической бумаге статистические зависимости $P(t)$ во всех случаях хорошо сглаживаются прямой линией, что указывает на экспоненциальный закон надежности машин серии П, имеющий вид

$$P(t) = \exp[-\lambda t]. \quad (9)$$

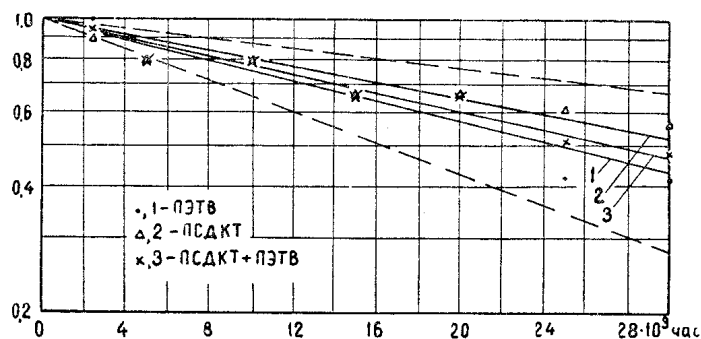


Рис. 2. Функция вероятности безотказной работы якорной обмотки машин серии П 1—6 габаритов

При экспоненциальном законе надежности интенсивность отказов λ постоянна, а это говорит об отсутствии предполагавшегося ранее периода приработки машин серии П 1-6 габаритов. В диапазоне 0—30 000 часов работы не наблюдается увеличения интенсивности отказов, что указывает на отсутствие заметного старения изоляции обмоток якоря и износа других узлов машины, а схема отказов машин соответствует схеме мгновенных повреждений с точки зрения математического описания процесса. Приработочные и износные отказы отсутствуют. Ресурс машин серии П 1-6 габаритов, определяемый по ГОСТ 13377-67 как наработка до предельного состояния, не позволяющего дальнейшую эксплуатацию машин, равен не менее 30 тысячам часов.

Сглаживание экспериментальных зависимостей выполнено методом наименьших квадратов. По полученным кривым определены интенсивности отказов машин и отдельно обмоток якоря, значения которых даны в табл. 2.

Таблица 2

Объект	Марка изоляции провода обмотки якоря	Интенсивность отказов, 1/час	Верхний доверительный предел 1/час	Нижний доверительный предел 1/час
Машина серии П	ПЭТВ	$4,2377 \cdot 10^{-5}$	$5,855 \cdot 10^{-5}$	$2,105 \cdot 10^{-5}$
	ПСДКТ	$3,36 \cdot 10^{-5}$		
	В среднем	$3,747 \cdot 10^{-5}$		
Обмотка якоря машины	ПЭТВ	$2,733 \cdot 10^{-5}$	$4,289 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$
	ПСДКТ	$2,108 \cdot 10^{-5}$		
	В среднем	$2,616 \cdot 10^{-5}$		

Доверительные пределы для интенсивности отказов определены при 95% доверительной вероятности по формулам:

$$\lambda_{\text{в}} = \frac{\lambda}{\gamma_3}, \quad \lambda_{\text{н}} = \frac{\lambda}{\gamma_1}. \quad (10)$$

Коэффициенты γ_1 и γ_3 определяются по табл. 11.2 [2].

Хотя в диапазоне 0—30 000 часов работы износных отказов нет, средний ресурс (50% — ресурс) машин серии П невелик. Он равен 16 500 часов для машин с обмоткой якоря из провода ПЭТВ и 21 000 часов для машин с обмоткой якоря из провода ПСДКТ. В среднем для всех машин он равен 18 500 часов. Снижение вероятности безотказной работы при эксплуатации машин происходит быстро. Восемидесятипроцентный ресурс машин не превышает 6 000 часов. Основные причины отказов машин — отказы обмотки якоря (75%), распайка соединений обмотки якоря с коллектором или замыкание в кол-

лекторе (12,5%) и появление сильного искрения на коллекторе (12,5%). Средняя наработка обмоток якоря составляет 20 300 часов, хотя износые явления не наблюдаются и к 30 000 часов. Повышение надежности машин постоянного тока серии П 1-6 габаритов может быть достигнуто прежде всего путем повышения надежности обмотки якоря, а также за счет улучшения качества пайки мест соединения обмотки с коллектором.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. В. Гнеденко, Ю. К. Беляев, А. Д. Соловьев. Математические методы в теории надежности, М., «Наука», 1965.
2. Я. Б. Шор, Ф. И. Кузьмин. Таблицы для анализа и контроля надежности. М., «Сов. радио», 1968.