

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ  
АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ И ЗАЩИТЫ  
НА НАДЕЖНОСТЬ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Б. А. ИТКИН, Э. К. СТРЕЛЬБИЦКИЙ

(Рекомендована научным семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники)

Важность вопроса повышения надежности асинхронных двигателей общеизвестна. Значительная доля отказов (10÷25%) этих двигателей происходит от действия перегрузочных и аварийных режимов за счет запаздывания или несрабатывания их системы защит. Поэтому одной из первоочередных задач в проблеме повышения эксплуатационной надежности асинхронных двигателей является проведение анализа и исследования влияния аварийных режимов и системы защиты на надежность двигателя. Вышеуказанные вопросы и рассматриваются в данной статье.

Для асинхронных электродвигателей наиболее распространенными и опасными аварийными режимами считаются: а) двухфазное короткое замыкание (стояние двигателя на 2 фазах), б) трехфазное короткое замыкание (на двигатель подается полное напряжение сети при неподвижном роторе).

По нашим статистическим данным, на основании наблюдения за парком электродвигателей завода НЗТСГ, для механических цехов потоки 2 и 3 коротких замыканий на парк в  $n=1000$  двигателей за год соответственно составляют  $\Phi_2=150\div 250$ ;  $\Phi_3=70\div 150$ , т. е. вероятность прихода потока аварий на один двигатель за год  $p_2=(0,15\div 0,25)\cdot 10^{-2}$ ;  $p_3=(0,07\div 0,15)\cdot 10^{-2}$ ; и математическое ожидание числа потока аварий на один двигатель за год

$$\lambda = np \quad (1)$$

будет  $\lambda_2=1,5\div 2,5$ ;  $\lambda_3=0,7\div 1,5$ .

Известно [1], если вероятность появления события в малом промежутке времени  $\Delta t$  пропорциональна  $\Delta t$  и события появляются независимо друг от друга, то число появлений события в течение данного промежутка времени распределяется по закону Пуассона. Обычно закон Пуассона применим для явлений, где вероятность рассматриваемого события  $p$  небольшая, а  $n$  велико и  $\lambda \leq 15$  [2]. Все это в полной мере соответствует характеру аварийных режимов. Поэтому распределение вероятностей прихода двух- и трехфазных коротких замыканий принимаем по закону Пуассона

$$P_{m,n} = \frac{\lambda^m e^{-\lambda}}{m!} \quad (2)$$

Аварийные режимы приводят к износу изоляции обмотки статора или к полному выходу из строя электродвигателя. Величина износа изоляции (уменьшение ресурса) двигателя зависит как от характера

и величины аварийного режима, так и от характеристики системы защиты его. Под характеристикой системы защиты понимается совокупная характеристика отключения двигателя как в результате срабатывания защиты по обобщенной токовременной характеристике его защитных аппаратов, так и действий оператора.

В табл. 1 приведены основные системы защит асинхронных двигателей и их доля в станочном парке механических цехов (по результатам проверки трех цехов завода НЗТСГ).

Таблица 1.

№ пп.	Тип системы защиты	% от всего парка асинхрон. двигателей
1	Реле тепловые и предохранители	54
2	Тепловые реле	12
3	Предохранители	15
4	Автоматические выключатели	7
5	Автоматические выключатели и тепловые реле	6
6	Реле максимального тока с предохранителями или тепловыми реле, а также другие системы защит	5
7	Нет защиты	2

Для учета влияния аварийных режимов необходимо знать закон плотности вероятности срабатывания защиты при двух- и трехфазных коротких замыканиях. Соответствующие проверки защит показали, что в большинстве случаев этот закон нормальный

$$f(t)_3 = \frac{1}{\sigma_n \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-t)^2}{2\sigma_n^2}}. \quad (3)$$

В приложении 1 приведено выравнивание статистического распределения срабатывания защиты 53 двигателей типа АО41-4 при двухфазном коротком замыкании по нормальному закону. Полученная вероятность  $p=0,891$  по критерию  $\chi^2$  является приемлемой.

Отключение аварийного режима может быть произведено и оператором (станочником). Данные по закону реакции станочника при аварийных режимах двигателей отсутствуют. Поэтому для определения плотности вероятности отключения двигателя оператором —  $f(t)_{оп}$  был поставлен эксперимент: у 60 асинхронных двигателей защитная аппаратура была зашунтирована и искусственно производились 2-фазные к. з. без предупреждения станочника и регистрировалось время отключения двигателя. Результаты опытов в виде статистического ряда приведены в табл. 2. Там же даны вычислительные значения  $np_i$ .

Таблица 2

$t_i$	4;16	16;28	28;40	40;52	52;64	64;76	76;88	88;100
$m_i$	9	15	14	10,5	7,5	2	1	1
$np_i$	7,578	13,512	15,34	11,112	7,098	3,44	1,518	0,519

Проверка согласованности полученного статистического распределения с теоретическим по закону Релея

$$f(t)_{оп} = \frac{t}{\sigma_p^2} \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma_p^2}\right) \quad (4)$$

по критерию  $\chi^2$  показала, что данную гипотезу можно считать правдоподобной. В общем виде формула для определения  $p_i$  вероятности попадания в разряды [3]

$$p_i = \int_{t_i}^{t_{i+1}} f(t) dt. \quad (5)$$

После подстановки в (5) выражения (4) и ряда преобразований получаем

$$p_i = \exp \left[ -\frac{1}{2} \frac{t_i^2}{\sigma_p^2} \right] - \exp \left[ -\frac{1}{2} \frac{t_{i+1}^2}{\sigma_p^2} \right]. \quad (6)$$

Значение меры расхождения, определенное по [3], будет

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^8 \frac{(m_i - np_i)^2}{np_i} = 1,84, \quad (7)$$

где

$m_i$  — число наблюдений в разряде;

$n$  — общее число опытов ( $n=60$ ).

При числе степеней свободы  $r=6$  и  $\chi^2=1,84$  по таблице [3]  $p=0,93$  — вероятность того, что за счет чисто случайных причин мера расхождения теоретического и статистического распределений будет не меньше, чем фактически наблюдаемые в опыте.

При указанных законах  $f(t)_з$  и  $f(t)_{оп}$  плотность вероятности срабатывания системы защиты при аварийных режимах определяется [4]

$$f(t) = e^{-\frac{t^2}{2\sigma_p^2}} \left[ \frac{1}{\sigma_H} \sqrt{\frac{1}{2\pi}} e^{-\frac{(t-\bar{t})^2}{2\sigma_p^2}} + \frac{t}{\sigma_p^2} F\left(\frac{\bar{t}-t}{\sigma_H}\right) \right]. \quad (8)$$

Для расчета износа двигателей от коротких замыканий, кроме данных по потокам аварий и  $f(t)$ , должны быть данные по надежности срабатывания защиты. Целесообразно также отдельно учитывать, не включая в закон  $f(t)_з$  защиты, у которых время несрабатывания такого порядка, что приводит к выходу из строя двигателя с одного аварийного режима.

Возможны два метода расчета. Один из них это применение метода статистических испытаний, когда процесс моделируется на ЭЦВМ, определяются двигатели, на которые попадают аварийные потоки, и для них производится подсчет израсходования ресурса [5]. По другому методу расчет производится аналитически с помощью предварительно рассчитанных таблиц [4].

Надо отметить, что в литературе отсутствуют специальные формулы для расчета износа изоляции двигателя от аварийных режимов. Имеющиеся формулы учитывают только фактор теплового старения и выведены в основном для изоляции класса «А». Для ликвидации указанного пробела нами проводятся испытания на износ от коротких замыканий двигателей новой серии АО2-32-4 с изоляцией класса «Е» с применением статистического метода планирования экстремальных экспериментов [6]. Данный метод позволяет не только получить интерполяционную формулу, но и математическую модель процесса. При этом износ изоляции, выраженный числом коротких замыканий —  $N$ , определяется выражением

$$\ln N = b_0 = b_1 \vartheta_M - b_2 \vartheta_H - b_3 T_{V0} - b_{12} \vartheta_M \vartheta_H - b_{13} \vartheta_M T_{V0} - b_{23} \vartheta_H T_{V0} - b_{11} \vartheta_M^2 - b_{22} \vartheta_H^2 - b_{33} T_{V0}^2, \quad (9)$$

где

$b_0, b_1, \dots, b_{33}$  — коэффициенты регрессии квадратичного уравнения (9);

$\vartheta_M$  — максимальная температура обмотки статора при коротком замыкании;

$\vartheta_H$  — начальная температура обмотки;

$T_{v0}$  — начальная скорость нарастания температуры в обмотке статора при коротком замыкании.

Полученные законы распределения потоков аварийных режимов, плотности срабатывания системы защиты и формула (9) износа изоляции дают возможность проводить исследование влияния коротких замыканий на надежность асинхронных двигателей. Определение фактического уровня износа изоляции от действия аварийных режимов также необходимо для правильного выбора защиты с учетом полного использования по мощности двигателей.

### Приложение 1

Данные проверки срабатывания защиты из теплового реле типа РТ1 № 28 (или № 29) и предохранителей типа ПР 2-15 со вставкой на 10 а в цепи 53 асинхронных двигателей типа АО41-4 при двухфазном коротком замыкании приведены в табл. 3 в виде статистического ряда.

Таблица 3

i	16;24	24;32	32;40	40;48	48;56	56;64	64;72	72;88
$m_i$	2,5	7,5	16	14	9	6	2	2
p	3,022	6,38	9,72	11,38	9,93	6,44	3,18	1,272

Произведем проверку согласованности полученного статистического распределения с теоретическим по нормальному закону. По формулам [3] определим математическое ожидание  $\bar{t}^x = 44,3$  и среднее квадратическое отклонение  $\sigma^x = 14,7$  статистического ряда. Принимаем теоретический нормальный закон распределения с параметрами  $\bar{t} = 44,3$ ;  $\sigma = 14,7$ . Найдем вероятности —  $p_i$  попадания в разряды [3]

$$P_i = \frac{1}{2} \left[ \hat{\Phi} \left( \frac{t_{i+1} - \bar{t}}{\sigma \sqrt{2}} \right) - \hat{\Phi} \left( \frac{t_i - \bar{t}}{\sigma \sqrt{2}} \right) \right]. \quad (10)$$

По (7) определяем значение меры расхождения  $\chi^2 = 1,676$ . Определим число степеней свободы как число разрядов минус число наложенных связей [3]  $g = 8 - 5 = 3$ .

По таблице [3] находим искомую вероятность  $p = 0,891$ . Полученная вероятность не является малой, поэтому гипотезу о том, что плотность срабатывания защиты при коротком замыкании распределена по нормальному закону, можно считать правдоподобной.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Я. Б. Шор. Статистические методы анализа и контроля качества и надежности. «Советское радио», 1962.
2. Л. Н. Большев, Н. В. Смирнов. Таблицы математической статистики. «Наука», 1965.
3. Е. С. Вентцель. Теория вероятностей. Физматгиз, 1962.
4. А. С. Гитман, Б. А. Иткин, Э. К. Стрельбицкий. Математическая модель влияния защиты и аварийных режимов на надежность асинхронных двигателей. Изв. ТПИ, т. 172, 1967.
5. Б. А. Иткин, Э. К. Стрельбицкий. О влиянии защиты на эксплуатационную надежность асинхронных двигателей. Изв. ТПИ, т. 160, 1966.
6. В. В. Налимов, Н. А. Чернова. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. «Наука», 1965.