

ИССЛЕДОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ И СИСТЕМ

А.В. ПОПОВ

Казанский государственный энергетический университет

В статье рассматриваются вопросы исследования и разработки методов расчета эксплуатационной надежности асинхронных электродвигателей с использованием структурно-функциональных моделей, позволяющих формировать вероятностно-статистические уравнения отказов деталей и узлов электрической машины. Предлагаемые структурно-функциональные модели обмотки статора позволяют на этапе проектирования оптимизировать параметры надежности и интенсивности отказов элементов асинхронного электродвигателя.

Ключевые слова: асинхронный электродвигатель, статор, вероятность отказов, надежность, изоляция обмотки статора, структурно-функциональные связи, проектирование электрической машины.

На нефтехимических комплексах и в других отраслях промышленности нашли широкое распространение асинхронные двигатели (АД) мощностью до 2000 кВт и более. Только в системе электроснабжения ОАО «Нижнекамскнефтехим» эксплуатируется более 25000 электродвигателей. Значительная часть отказов приходится на повреждение обмоток статора и составляет 95%, в том числе: межвитковое замыкание – 93%; пробой межвитковой изоляции – 5%; пробой пазовой изоляции – 2%. На подшипниковый узел приходится 5% отказов. В промышленности в течение года подвергаются ремонту до 10% парка АД. Основными факторами, приводящими к отказам, являются: технологические – 35%; эксплуатационные – 50%; конструкционные – 15%. Анализ и исследование эксплуатационной надежности показывает, что значительная часть отказов АД происходит из-за отклонений, допускаемых при проектировании. Объясняется это низким уровнем применяемых методов расчета и моделирования эксплуатационной надежности, что позволяет «просачиваться» в эксплуатацию заведомо дефектным элементам АД. Для повышения их надежности предлагаются современные методы и модели надежности, которые учитывают, в отличие от существующих, свойства структуры узла и функциональные связи между деталями и узлами машины.

Анализ элементной базы паза АД позволяет выделить следующие детали: секции катушек, витковую изоляцию, изоляцию катушек, изоляцию корпусную, пазовый клин, прокладку под клин [1].

На рис.1 показана структурная схема элементной базы паза статора по принятой классификации. Она состоит из деталей – это секции катушек, клинья паза, изоляции витковая, катушек, корпуса паза. Введены новые параметры в виде геометрических установочных размеров. Это различные виды соединений с натягом и зазором, которые характеризуют коэффициент заполнения паза.

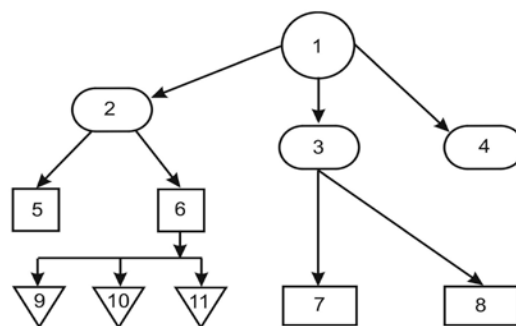


Рис. 1. Структурная схема элементной базы паза асинхронного двигателя:
 1 – паз статора; 2 – детали; 3 – соединение; 4 – геометрический параметр (допуски);
 5 – секция; 6 – изоляция; 7 – натяг; 8 – зазор; изоляции: 9 – витковая; 10 – катушки; 11 – корпусная

Построим структурную схему паза статора с проводниками обмотки АД из прямоугольного провода с изоляцией, состоящего из следующих деталей: проводников обмотки – C_i ; обволакивающего покрытия (изоляция) секций – d_i ; скрепляющей катушки изоляционной ленты – e_i ; корпусной изоляции (пазовый короб) – f_i , состоящей из прокладки на дне паза; прокладки между слоями обмоток; прокладки под клин; пазового клина.

На основе поэлементного анализа функциональных и конструктивных характеристик построена структурно-функциональная модель, показанная на рис. 2. В данной структуре, в результате проведенных исследований, были выделены наиболее важные характерные признаки конструкции паза.

Важнейшей характеристикой надежности работы паза АД является вероятность безотказной работы (ВБР), характеризующаяся элементной базой паза и отказами в эксплуатации, которые во времени имеют случайный характер и могут происходить при определенных эксплуатационных условиях. Необходимо отметить, что отказы элементов могут происходить несовместно или совместно. События считаются несовместными, если их одновременное появление при осуществлении комплекса условий невозможно, т.е. появление одного события исключает появление события другого.

Если отказ одного элемента паза вызывает отказ другого, тогда это будет считаться последствием отказа. Будем считать, что в расчетах используется статистика об отказах элементов при условии отсутствия последствия. В этом случае полученные потоки отказов деталей паза будут адекватными. С точки зрения качества оцениваемых параметров надежности необходимо ввести дополнительные условия, когда математическое ожидание (M) совпадает со значением оцениваемого теоретического параметра $M(\lambda) = \lambda$. В этом случае статистический поток отказов может считаться несмещенным. В противном случае, при несоблюдении этого условия оценка интенсивности отказов детали будет считаться смещенной.

Следующим важным условием, предъявляемым к данной методике, является свойство эффективности. Эффективной оценкой интенсивности отказов называется несмещенная статистическая оценка, если среди всех подобных оценок той же характеристики она имеет наименьшую дисперсию.

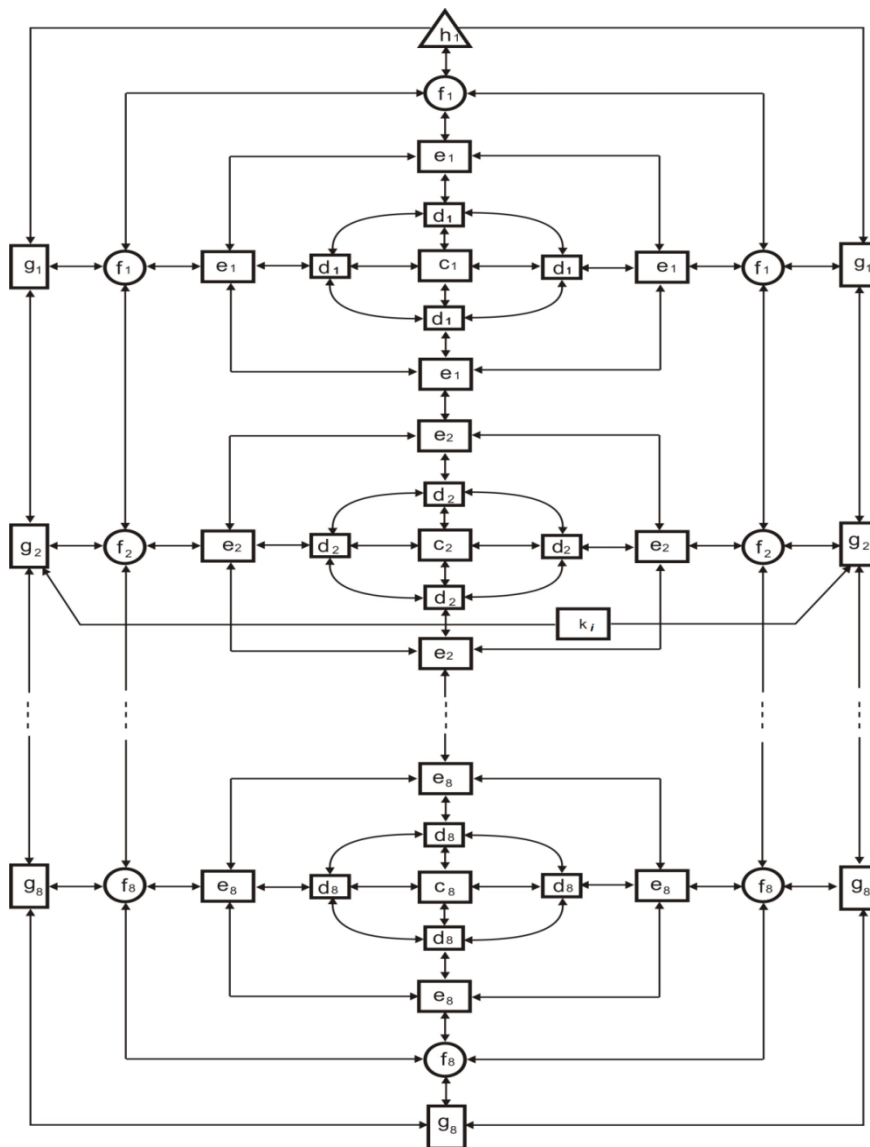


Рис. 2. Структурно-функциональная схема элементной базы паза статора АД: секции катушек паза – c_i ; изоляция секций катушек – d_i ; изоляция катушек обмотки – e_i ; изоляция корпусная – f_i ; железо сердечника якоря – g_i ; пазовый клин – k_i ; геометрический параметр – h_i . Количество слоев катушек – 8.

При обработке статистики об отказах электрических машин в силу различных причин могут быть допущены ошибки, которые формируются из систематических и случайных составляющих. Поэтому при оценке параметров необходимо, чтобы удовлетворялось требование состоятельности оценок λ :

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P \left\{ \left| \lambda - \Lambda \right| \leq \varepsilon \right\} \neq 0, \quad (1)$$

где ε – наперед заданное значение ошибки (погрешности).

Имеет место сходимость по вероятности [2].

Приведенные требования дают возможность оценить качество исходной статистической информации. Это является важным условием в дальнейшем анализе надежности узла паза.

На основании модели рис. 2 определим вероятностные выражения для отдельных звеньев узла паза статора:

$$\begin{aligned}
 P_{1.1}(g_1)P_{1.2}(f_1)P_{1.3}(e_1)P_{1.4}(d_1)P_{1.5}(c_1)P_{1.6}(k) &\leq P_1, \\
 P_{2.1}(g_2)P_{2.2}(f_2)P_{2.3}(e_2)P_{2.4}(d_2)P_{2.5}(c_2)P_{2.6}(k) &\leq P_2, \\
 &\vdots \\
 P_{8.1}(g_8)P_{8.2}(f_8)P_{8.3}(e_8)P_{8.4}(d_8)P_{8.5}(c_8)P_{8.6}(k) &\leq P_8.
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

При этом должно соблюдаться необходимое условие:

$$P_1 \cdot P_2 \cdot \dots \cdot P_{m-1} \cdot P_m \leq 1.$$

В начальной стадии эксплуатации после завершения периода приработки левая часть уравнения должна быть близка 1. Затем, в период установившегося износа элементов системы она будет асимптотически уменьшаться от 1 до 0.

Полученные неравенства позволяют расчетным путем определять рациональные параметры надежности элементов.

Ранее было отмечено, что отказы деталей паза во времени представляют собой поток отказов. Это последовательность отказов, которые наступают в случайные моменты времени. По условиям исследования принимается простейший вид потока. Для этого он должен удовлетворять следующим свойствам: стандартности, отсутствия последействия и ординарности.

Свойство стационарности потока отказа деталей состоит в том, что вероятность появления m отказов за промежуток времени длительностью t зависит только от числа отказов m и времени t и не зависит от начала отсчета времени. Это означает, что вероятности появления m отказов деталей паза одинаковы на любом интервале времени одинаковой длительности. При этом интервалы берутся непересекающиеся.

Важным свойством также является отсутствие последействия отказов деталей паза статора. Это значит, что вероятность появления m событий в любом промежутке времени не зависит от того, появились ли события в моменты времени, предшествующие началу рассматриваемого промежутка. Иными словами, отказ детали не должен быть следствием предыдущего отказа.

Таким образом, можно считать, что условная вероятность m отказов деталей на различных интервалах времени эксплуатации узла, определяемая в предположении о том, что было ранее по времени относительно рассматриваемого промежутка, равна безусловной вероятности появления m событий на этом интервале времени эксплуатации АД.

Необходимо также отметить требование к свойствам ординарности потока отказов деталей машин, заключающееся в следующем. Вероятность появления двух и более отказов за бесконечно малый промежуток времени эксплуатации машины пренебрежимо мала по сравнению с вероятностью появления одного события. И последнее. Поток отказов должен удовлетворять свойству суммы стационарных потоков: если некоторый поток является суммой большого числа независимых стационарных потоков и влияние каждого слагаемого на сумму мало, то суммарный ординарный поток отказов деталей паза близок к простейшему.

Под понятием большого числа независимых стационарных потоков имеется в виду понятие отказов деталей паза i или ω_i , интегральные значения которых составляют Λ или Ω и удовлетворяют условиям: простейшего потока; стационарности; отсутствия последействия; ординарности; свойствам суммы стационарных потоков. Для завершения требований принимаемых предпосылок необходимо принять еще одно важное допущение о функции плотности распределения.

Из априорных данных и проведенных исследований надежности и отказов деталей и узлов АД будем считать, что простейшие потоки Ω имеют функции плотности распределения, подчиняющиеся закону Гаусса, характеризующегося следующими параметрами:

– математическое ожидание

$$M(X) = \int_{-\infty}^{\infty} x \cdot f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} x e^{-\frac{(x-d)^2}{2\sigma^2}} dx, \quad (3)$$

где x – случайная величина; σ – среднеквадратическое отклонение;

– дисперсия

$$D(X) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} (x-d)^2 \cdot e^{-\frac{(x-d)^2}{2\sigma^2}} dx, \quad (4)$$

где d – среднее значение.

Принятые условия позволяют повысить качество математического моделирования надежности элементов АД. Ранее было отмечено, что моделирование по конструктивному признаку учитывает функциональные межэлементные связи узла машины.

Построим уравнения вероятности отказов деталей паза по конструктивному признаку с учетом функциональных связей между элементами системы (рис. 2).

Для первого звена паза выражение вероятности отказа будет иметь вид

$$\begin{aligned} Q_1(t) = & Q_{g1} + (1 - Q_{g1})Q_{f1} + \\ & + (1 - Q_{g1})(1 - Q_{f1})Q_{e1} + \\ & + (1 - Q_{g1})(1 - Q_{f1})(1 - Q_{e1})Q_{d1} + \\ & + (1 - Q_{g1})(1 - Q_{f1})(1 - Q_{e1})(1 - Q_{d1})Q_{c1} + \\ & + (1 - Q_{g1})(1 - Q_{f1})(1 - Q_{e1})(1 - Q_{d1})(1 - Q_{c1})Q_{k1}. \end{aligned} \quad (5)$$

Определим уравнение для второго звена паза:

$$\begin{aligned} Q_2(t) = & Q_{g2} + (1 - Q_{g2})Q_{f2} + \\ & + (1 - Q_{g2})(1 - Q_{f2})Q_{e2} + \\ & + (1 - Q_{g2})(1 - Q_{f2})(1 - Q_{e2})Q_{d2} + \\ & + (1 - Q_{g2})(1 - Q_{f2})(1 - Q_{e2})(1 - Q_{d2})Q_{c2} + \\ & + (1 - Q_{g2})(1 - Q_{f2})(1 - Q_{e2})(1 - Q_{d2})(1 - Q_{c2})Q_{k2}. \end{aligned} \quad (6)$$

Далее, составив по аналогии следующие уравнения для 3-8 звеньев, приведем уравнение для самого нижнего слоя находящегося на дне паза:

$$\begin{aligned} Q_8(t) = & Q_{g8} + (1 - Q_{g8})Q_{f8} + \\ & + (1 - Q_{g8})(1 - Q_{f8})Q_{e8} + \\ & + (1 - Q_{g8})(1 - Q_{f8})(1 - Q_{e8})Q_{d8} + \\ & + (1 - Q_{g8})(1 - Q_{f8})(1 - Q_{e8})(1 - Q_{d8})Q_{c8} + \\ & + (1 - Q_{g8})(1 - Q_{f8})(1 - Q_{e8})(1 - Q_{d8})(1 - Q_{c8})Q_{k8}. \end{aligned} \quad (7)$$

Полученные уравнения описывают состояние вероятности отказа с учетом характеристик каждого из элементов системы. Важным положительным свойством

методики является возможность расчета надежности элементов по различным координатам сечения паза. Можно выделять элементы в группы, которые имеют несколько функциональных связей и требуют повышенной надежности. Или путем исследования различных комбинаций в структуре определять наиболее надежные или наименее надежные элементы и звенья системы.

Безусловно, на данном этапе исследования разработать оптимальный вариант поиска и решения задачи является сложным. Поэтому ограничимся тем, что дадим общую оценку надежности элементов паза. Работа будет выполняться в направлении оценки и оптимизации параметров надежности системы на основании полученных аналитических вероятностей отказов элементов системы.

Для этого перейдем от звеньев к системе в целом. Пусть по выборке объема m найдена оценка параметра θ_1 . При повторении опыта происходит извлечение другой выборки того же объекта из генеральной совокупности и получается другая оценка θ_2 неизвестного теоретического параметра θ . Повторяя o раз, получаем k различных оценок. Поэтому оценку θ можно рассматривать как случайную величину, которая может принимать значения $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k$.

Это позволяет сформировать уравнение вероятности отказа паза статора:

$$\begin{aligned} Q_{\Sigma}(t) = & Q_1 + (1 - Q_1)Q_2 + (1 - Q_1)(1 - Q_2)Q_3 + \\ & + (1 - Q_1)(1 - Q_2)(1 - Q_3)Q_4 + \\ & + (1 - Q_1)(1 - Q_2)(1 - Q_3)(1 - Q_4)Q_5 + \\ & + (1 - Q_1)(1 - Q_2)(1 - Q_3)(1 - Q_4)(1 - Q_5)Q_6 + \\ & + (1 - Q_1)(1 - Q_2)(1 - Q_3)(1 - Q_4)(1 - Q_5)(1 - Q_6)Q_7 + \\ & + (1 - Q_1)(1 - Q_2)(1 - Q_3)(1 - Q_4)(1 - Q_5)(1 - Q_6)(1 - Q_7)Q_8. \end{aligned} \quad (8)$$

Полученное выражение характеризует отказ узлов звеньев системы. Оно является обобщенным и включает в себя всю элементную базу системы.

Если при проектировании узла ЭМС возникает необходимость анализа надежности деталей паза для слоев секций катушек паза, тогда, пользуясь предложенной методикой, можно получить уравнение отказа вертикальных звеньев. Они будут иметь следующий вид:

для первого слоя укладки секции

$$\begin{aligned} Q_1(t) = & Q_{g1} + (1 - Q_{g1})Q_{h1} + \\ & + (1 - Q_{g1})(1 - Q_{h1})Q_{f1} + \\ & + (1 - Q_{g1})(1 - Q_{h1})(1 - Q_{f1})Q_{e1} + \\ & + (1 - Q_{g1})(1 - Q_{h1})(1 - Q_{f1})(1 - Q_{e1})Q_{d1} + \\ & + (1 - Q_{g1})(1 - Q_{h1})(1 - Q_{f1})(1 - Q_{e1})(1 - Q_{d1})Q_{c1}. \end{aligned} \quad (9)$$

Для второго слоя укладки секций катушек статора АД

$$\begin{aligned} Q_2(t) = & Q_{e2} + (1 - Q_{e2})Q_{d2} + (1 - Q_{e2})(1 - Q_{d2})Q_{c2} + \\ & + (1 - Q_{e2})(1 - Q_{d2})(1 - Q_{c2})Q_{k2}. \end{aligned} \quad (10)$$

По аналогии формируются уравнения вероятности отказа с 3 по 7 витков катушки паза. Для нижнего слоя секций будет иметь место выражение

$$\begin{aligned} Q_8(t) = & Q_{e8} + (1 - Q_{e8})Q_{d8} + (1 - Q_{e8})(1 - Q_{d8})Q_{c8} + \\ & + (1 - Q_{e8})(1 - Q_{d8})(1 - Q_{c8})Q_{f8}. \end{aligned} \quad (11)$$

Анализ надежности элементной базы показывает, что условия, в которых работают детали паза обмотки, являются не одинаковыми по обоим координатам

секции паза. Следовательно и их надежность будет также отличаться. Так, например, витки катушек, расположенные в зоне клина (h), и находящиеся на дне паза будут иметь различные температурные значения. В первом случае температура будет ниже. Следовательно, изоляция, находящаяся на дне паза, будет иметь меньший ресурс по сравнению с секциями, расположенными ближе к клину, где условия теплоотвода лучше за счет вентилируемого воздуха в воздушном зазоре машины [3].

Сказанное требует необходимости формирования вероятностной модели с целью оценки параметров надежности по вертикали сечения паза (см. рис. 2). Она будет иметь следующий вид.

Вероятность отказа элементов будет равна:

$$\begin{aligned}
 Q_g(t) = & 1 - (1 - Q_h)Q_{f1} + (1 - Q_h)(1 - Q_{f1})Q_{e1} + \\
 & + (1 - Q_h)(1 - Q_{f1})(1 - Q_{e1})Q_{d1} + \\
 & + (1 - Q_{h1})(1 - Q_{f1})(1 - Q_{e1})(1 - Q_{d1})Q_{c1} + \\
 & + (1 - Q_{h1})(1 - Q_{f1})(1 - Q_{e1})(1 - Q_{d1})(1 - Q_{c1})Q_{e1} + \\
 & + (1 - Q_{h1})(1 - Q_{f1})(1 - Q_{e1})(1 - Q_{d1})(1 - Q_{c1})(1 - Q_{d1}) \cdot \\
 & \cdot (1 - Q_{e1})Q_{e2} + (1 - Q_{h1})(1 - Q_{f1})(1 - Q_{e1})(1 - Q_{d1})(1 - Q_{c1}) \cdot \\
 & \cdot (1 - Q_{d1})(1 - Q_{e1})(1 - Q_{e2})Q_{d2} + (1 - Q_{h1})(1 - Q_{f1})(1 - Q_{e1}) \cdot \\
 & \cdot (1 - Q_{d1})(1 - Q_{c1})(1 - Q_{d1})(1 - Q_{e1})(1 - Q_{e2})(1 - Q_{d2})Q_{c2} + \\
 & + (1 - Q_{h1})(1 - Q_{f1})(1 - Q_{e1})(1 - Q_{d1})(1 - Q_{c1})(1 - Q_{d1}) \cdot \\
 & \cdot (1 - Q_{e1})(1 - Q_{e2})(1 - Q_{d2})(1 - Q_{c2})Q_{d2} + \dots \\
 & \dots + (1 - Q_{e8})(1 - Q_{d8})(1 - Q_{c8})(1 - Q_{d8})(1 - Q_{e8})Q_{g8}. \quad (12)
 \end{aligned}$$

Полученное уравнение является аналитической зависимостью вероятности отказа деталей паза статора.

Полученные результаты являются важными с точки зрения выделения элементной базы паза для дальнейших исследований и анализа надежности узлов и деталей машины. Широко используемые групповые методы оценки надежности параметров надежности машин, как это было сказано ранее, являются не адекватными, и не дают возможности исследовать межэлементные связи узла конструкции. В этом смысле полученные математические уравнения позволяют выявить наименее надежные элементы, определить уровень необходимой (требуемой) надежности узла для выполнения заданных величин ТЗ.

Таким образом, полученные уравнения позволяют решить две важные задачи:

- при необходимости исследовать надежность элементной базы машины на этапе проектирования с целью выявления слабых звеньев, используя априорные данные о надежности секций катушек, витковой, корпусной изоляции и др.;
- при необходимости определить рациональные уровни вероятности безотказной работы и наработки на отказ, которые позволили бы реализовать в эксплуатации машины установленные уровни надежности при заданных в ТЗ на проектирование машины параметрах надежности.

Безусловно, заложенные в уравнениях межэлементные связи позволяют повысить адекватность оценок характеристик надежности элементной базы и в целом надежность исследуемого узла за счет увеличения точности моделирования узла.

Полученные уравнения дают возможность итерационным методом исследовать элементную структуру паза и определить уровень рациональной надежности, которая может иметь при этом однородные и неоднородные элементы. Последние могут иметь

различные соотношения в зависимости от конструкции узла. Для оценки надежности паза с четырьмя группами элементов вероятность отказа будет иметь вид

$$Q_c = Q_1 + (1 - Q_1)Q_2 + (1 - Q_1)(1 - Q_2)Q_3 + (1 - Q_1)(1 - Q_2)(1 - Q_3)Q_4, \quad (13)$$

где $Q_1 - Q_4$ – вероятности отказов элементов узла.

Структурный анализ деталей паза показывает, что в нем имеют место как однородные так и неоднородные детали. Преобразуем исходное уравнение для однородных деталей. Тогда будет иметь место выражение

$$Q_c = 4Q - 6Q^2 + 4Q^3 - Q^4. \quad (14)$$

Примем, что $Q = 0,1$. Тогда $Q_c = 0,4641$. При этом надежность системы $P_c = 0,5359$. Для одного элемента системы будет $P_3 = 0,7321$.

В практических расчетах могут иметь место два варианта. Первый – когда все элементы системы неоднородные. Во втором случае имеются как группы однородных элементов, так и неоднородных. Как было показано ранее, в первом случае определение параметров надежности значительно облегчается путем простых преобразований расчетных формул.

В общем случае необходимо использовать в расчете надежности на этапе проектирования обобщенные уравнения вероятностей отказа, хотя это не исключает использования на этапе проектирования отдельных фрагментов (групп) элементов паза машины, что часто бывает необходимым делать на этапах согласования характеристик надежности и проектирования при заданных параметрах ТЗ [3].

Вероятность отказа любого элемента паза будет иметь выражение

$$\frac{dg}{dt} = -\frac{dP}{dt}. \quad (15)$$

Интенсивность отказов в системе определяется следующей зависимостью:

$$\lambda(t) = \frac{1}{P(t)} \cdot \frac{dq(t)}{dt}. \quad (16)$$

Производя последовательно подстановку уравнений вероятности отказов для различных звеньев паза, получим зависимости интенсивности отказов, на основании которых можно определить уровни надежности паза статора.

В пазу каждый из элементов имеет определенный уровень интенсивности отказов, т.е. $\lambda_1; \lambda_2; \dots; \lambda_i$. В принятой постановке решения задачи примем дополнительное условие: интенсивность отказов любого элемента обладает определенной дисперсией, изменение которой во времени представляет собой случайный процесс. Ранее было принято условие, что он подчиняется закону Гаусса. Тогда должно выполняться следующее условие: отношение математического ожидания к среднеквадратическому отклонению должно быть равно или больше двух.

Полученные аналитические зависимости дают возможность на этапе проектирования машины оценить надежность паза статора. Для этого необходимо иметь данные интенсивностей потока отказов элементов. В случае, если надежность узла на этапе проектирования не соответствует установленной норме технического задания на проектирование данного узла из-за низкой надежности отдельных деталей, тогда характеристика λ_i корректируется и расчет надежности узла производится заново. Процедура повторится до тех пор, пока уровень надежности не достигнет установленного значения. После этого корректируются конструктивные, физические, нагрузочные и др. параметры элементов системы или они замещаются более надежными. И делается это до тех пор, пока не будут получены установленные уровни надежности λ элементов системы. Необходимо также иметь в виду следующее. При

наличии дисперсии в расчетах принимается условие: $\lambda_i = \text{const}$. Это допущение позволяет значительно упростить методы расчета.

В последние годы большое распространение получили так называемые групповые или элементные методы расчета надежности. В нашем случае в методике учитываются конструктивные свойства узла, фиксированное положение элементов и межэлементные связи. Это позволяет дополнительно исследовать звенья системы, т.е. оценить параметры системы при различных конструктивных вариантах. В результате становится возможным выявлять наименее надежные звенья, выравнивать надежность элементов системы. Данная методика является очень полезной на ранней стадии проектирования электромеханических систем, когда необходимо установленную надежность в ТЗ распределить по элементам машины; определить их рациональную надежность в пазовом узле машины.

Для дальнейшего анализа элементов структуры паза уточним понятие свойств группы элементов. Однородная группа элементов – когда в нее входят детали с одинаковыми свойствами и $\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_n$; неоднородная группа – когда в нее входят элементы с различными свойствами, т.е. $\lambda_1 \neq \lambda_2 \neq \dots \neq \lambda_n$; смешанная группа – когда в нее входят элементы первого и второго вариантов.

Паз статора АД можно отнести к последнему варианту. При анализе надежности необходимо группировать по указанному критерию, составить группы элементов, имеющие общие характеристики. На основании проектной классификации можно выделить следующие группы: первая – секции катушек обмоток паза; вторая – витковая изоляция; третья – изоляция катушек; четвертая – изоляция (корпусная) паза.

Из условия независимости отказов секций, изоляций витковой, катушки и корпуса составим уравнение вероятности отказа. Тогда справедливо выражение

$$Q_c = Q_1 + (1 - Q_1)Q_2 + (1 - Q_1)(1 - Q_2)Q_3 + (1 - Q_1)(1 - Q_2)(1 - Q_3)Q_4 \quad (17)$$

где Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 – вероятности отказа групп однородных деталей.

Раскроем скобки в уравнении, приняв условие однородности элементов системы для Q_i – секции катушек обмоток паза; Q – витковой изоляции; изоляции катушек; изоляции корпусной паза.

Если принять вероятность отказа элемента равной 0,11, тогда для группы однородных элементов системы, состоящей из 4-х деталей, вероятность отказа будет равна 0,38. Вероятность безотказной работы при этом для группы элементов паза будет равна 0,62. Если эта величина не превышает заданное значение, то полученный уровень надежности группы принимается за основу. Данный алгоритм можно использовать тогда, когда необходимо проанализировать вероятность отказа однородных элементов внутри группы на соответствие их установленным нормам для узла.

Исследуем случай, который может иметь место в практике проектирования когда детали паза АД неоднородные, т.е. $\lambda_1 \neq \lambda_2 \neq \dots \neq \lambda_n$, имеют различные конструктивные функциональные свойства.

Уравнение вероятности отказа паза статора имеет 4 группы, каждая из которых может быть однородной, т.е. имеем смешанный случай. Внутри группы имеются однородные элементы. Между группами – неоднородные. Тогда уравнение вероятности отказа на основании ранее принятой классификации будет иметь вид

$$Q_n = Q_1 + (1 - Q_1)Q_2 + (1 - Q_1)(1 - Q_2)Q_3 + (1 - Q_1)(1 - Q_2)(1 - Q_3)Q_4, \quad (19)$$

где Q_1 – элементы секции катушек паза; Q_2 – элементы витковой изоляции; Q_3 – элементы изоляции катушки; Q_4 – элементы изоляции (корпусная) паза.

Проведем необходимые преобразования, тогда

$$Q_n = Q_1 + Q_2 - Q_1Q_2 + Q_3 - Q_2Q_3 - Q_1Q_3 - Q_1Q_2Q_3 + Q_3Q_4 - Q_2Q_3Q_4 - Q_1Q_3Q_4 + Q_1Q_2Q_3Q_4 - Q_3^2Q_4 + Q_2Q_3^2Q_4 + Q_1Q_3^2Q_4 - Q_1Q_2Q_3^2Q_4. \quad (20)$$

Полученное уравнение вероятности отказа позволяет производить расчет вероятности отказа паза на этапе проектирования. Если будет задана, в соответствии с параметрами ТЗ, характеристика надежности, то становится возможным оценить ее с учетом характеристик надежности элементов системы. При этом рассматривается более общий случай, когда детали паза являются неоднородными. Данная методика имеет ряд преимуществ перед существующими. Она позволяет производить расчет надежности конструкции машин с большой глубиной анализа надежности узлов и деталей. Это дает возможность, используя различные конструктивные варианты решения, добиваться высокого качества и точности оценок ее параметров.

Из изложенного можно сделать следующий вывод. Структурный анализ системы является необходимым и важным этапом общего исследования надежности АД. На начальном этапе проектирования машины он позволяет выявить конструктивные пороки системы и предложить рекомендации, направленные на совершенствование конструкции узла и повышение его ВБР.

Изложенные методы можно расширить, если в алгоритм расчета в качестве коэффициентов ввести интенсивности отказов элементов. В настоящее время, как было сказано ранее, они учитываются путем введения корректирующих коэффициентов к оценкам λ -характеристик.

Summary

This article discusses the research and development of methods for the calculation of operational reliability of induction motors using structural and functional models, allows you to create probabilistic and statistical equations failures of parts and assemblies of the machine. Proposed structural and functional model of the stator winding, which allows the design phase to optimize the parameters of reliability and failure rate items induction motor.

Keywords: induction motor, the stator, the probability of failure, reliability, insulation of the stator winding, the structural and functional connection, design of electrical machines.

Литература

1. Вдовин А.М. Повышение эффективности системы электроснабжения энергонасыщенного производства. Казань: Изд-во КГЭУ, 2012. 226 с.
2. Справочник по теории вероятностей и математической статистике / Издание второе переработанное дополненное. Главная редакция физико-математической литературы. М.: Наука, 1985. 640 с.
3. Идиятуллин Р.Г., Аухадеев А.Э., и др. Методика статистической оценки эксплуатационных параметров энергосбережения тяговых электродвигателей // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2005. № 3-4. С. 14-20.

Поступила в редакцию

09 апреля 2015 г.

Попов Александр Владимирович – аспирант кафедры «Электрический транспорт» (ЭТ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел: 8(843)519-43-54.