УДК 621.313

МЕТОДИКА РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ ОБМОТОК ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

ПОПОВ А.В., ИДИЯТУЛЛИН Р.Г., АУХАДЕЕВ А.Э.

Казанский государственный энергетический университет

В статье рассматриваются вопросы исследования и разработки методов расчёта характеристик надежности обмоток асинхронных электродвигателей (АД). Разработана методика оценки параметров надёжности асинхронных электродвигателей. Получены графические зависимости вероятности безотказной работы деталей и узлов асинхронных электродвигателей. Приведены расчётные данные интенсивности отказов элементов паза статора. Полученные результаты могут быть использованы на этапе проектирования АД, а также в эксплуатации для оптимизации системы планово-предупредительного ремонта АД.

Ключевые слова: асинхронные: асинхронные электродвигатели, характеристики надежности, вероятность безотказной работы, интенсивность отказов.

Важной характеристикой качества элементов электрических машин является их надёжность, т.е. способность выполнять функциональные требования в заданный период эксплуатации, когда имеет место воздействие эксплуатационных факторов. В совокупности влияние качества проектирования и отклонения от требований технических условий в эксплуатации приводит к отказам и неисправностям деталей и узлов асинхронных электродвигателей.

Известно, что диэлектрические свойства изоляции в процессе эксплуатации могут ухудшаться. Происходит её усадка в результате усыхания, снижается механическая прочность, уменьшается пробивное напряжение. Данный процесс называется старением. В изоляции происходят химические процессы, которые во многом зависят от температуры её нагревания. Чем выше температура обмоток АД, тем выше скорость старения изоляции, – тем ниже срок службы машины. Основными причинами повышения температуры могут быть увеличение нагрузки и снижение расхода воздуха в системе охлаждения. На этапе проектирования расчётно-экспериментальным путём нормируется допустимая величина нагрева частей электрической машины. При этом допустимый нагрев частей машины устанавливается таким образом, чтобы соприкасающаяся с ними или расположенная в непосредственной близости от них изоляция могла выполнять свои функции в течение расчётного срока эксплуатации АД. С учётом этого предельный уровень нагрева частей АД зависит от класса нагревостойкости изоляции.

Для учёта влияния эксплуатационных факторов на нагрев изоляции стандарты на электротехнические изделия нормируют не фактическую температуру, а величину превышения температуры над температурой охлаждающего воздуха, она принимается равной 40 ºС. Это условие является обязательным для машин общего назначения. На основании сказанного можно считать, что для изоляционного материала класса нагревостойкости *B* предельно допустимое превышение температуры обмотки будет равно 80 ºС. Данное условие должно соблюдаться в течение всего срока эксплуатации АД; выполнение этого условия позволит реализовать ресурс, установленный на этапе проектирования машины.

© А.В. Попов, Р.Г. Идиятуллин, А.Э. Аухадеев

Для сравнительного анализа надёжности элементов узла паза статора были определены их вероятности безотказной работы в функции от наработки. При этом $\lambda_к$ = 0,08, где суммируются интенсивность отказов витковой изоляции катушки и корпусной изоляции паза обмотки статора асинхронных двигателей. Интенсивность отказов $\lambda_э$ = 0,24 для принятого ранее значения величины перегрева обмотки, равного $10\ ^0$C.

Ранее было отмечено, что на работу узла статора влияют конструктивно-технологические решения. Они определяются $\lambda_к$. С увеличением прохождения количества дефектов узла в эксплуатацию интенсивность отказов увеличивается, т.е. становится больше значения, установленного ТЗ на проектирование. Если нагрузочные режимы АД в эксплуатации превышают пределы, установленные техническими условиями, тогда это вызовет возрастание $\lambda_к$. Интенсивность отказов λ зависит от качества проектирования, технологии изготовления и влияния внешних эксплуатационных факторов $\lambda_э$, т.е. $\lambda = \lambda_к + \lambda_э$. Если принять условие, что поток отказов подчиняется стационарному Пуассоновскому, тогда будем иметь выражение надёжности пазового узла статора АД

$$P(t) = e^{-(\lambda_k + \lambda_э)t},$$

где λ_k – поток отказов от конструктивно-технологических факторов; $\lambda_э$ – поток отказов от влияния эксплуатационных факторов.

Наиболее тяжёлым видом отказа АД является пробой изоляции обмотки статора, основной причиной которого является перегрев изоляции и, как следствие, её ускоренное старение. Основными видами отказов изоляции являются межвитковое замыкание, пробой изоляции катушки, замыкание катушки на корпус. При перегрузке АД, в силу воздействия отклонений в технологическом процессе, происходит возрастание тока нагрузки, что приводит к перегреву изоляции. На отказы изоляции приходится до 80% всех случаев разрушения АД.

На рис. 1 показаны графические зависимости влияния различных факторов в функции от наработки. Наибольшую вероятность безотказной работы (ВБР) определяют факторы, зависящие от качества конструирования. Более низкую надёжность формируют факторы, имеющие место в эксплуатации, − в этом случае невыполнение технических условий на эксплуатацию приводит к перегрузкам АД, перегреву изоляции, её тепловому пробою и, как следствие, – к отказу.

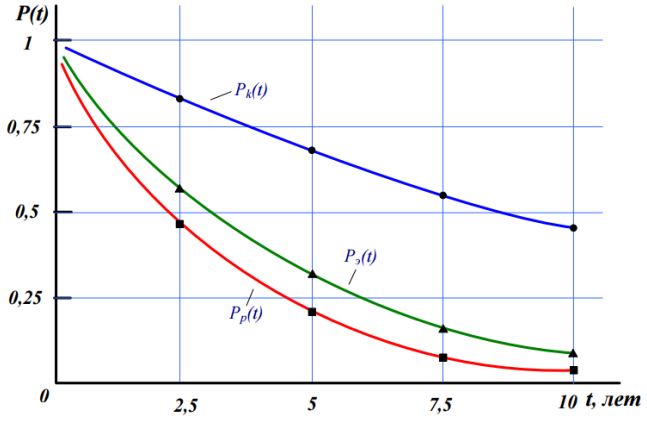

Рис. 1. Вероятность безотказной работы узла в функции времени:
Pk (t) – конструктивные факторы; *P*э (*t*) – эксплуатационные факторы;
*P*р (*t*) – результирующая надёжность

Построенные графические зависимости характеризуют вероятность безотказной работы в функции времени. Из приведенных зависимостей видно, что влияние условий эксплуатации на надёжность узла сильнее по сравнению с отказами, вызванными качеством проектирования и изготовления. На основании изложенного можно отметить следующие важные особенности проведённых исследований.

Первая – если имеет место $\lambda_k < \lambda_э$, тогда влияние конструкторско-технологических дефектов на надёжность паза будет ниже. Это тот случай, когда обеспечивается высокое качество проектирования и изготовления, но при этом в эксплуатации не выполняются технические условия. По результатам полученных данных можно отметить: за 10 лет эксплуатации надёжность изоляции АД с учётом влияния факторов на этапах проектирования и изготовления $P_k(t) = 0{,}45$, с учётом воздействия эксплуатационных факторов $P_э(t) = 0{,}09$. Таким образом, можно сказать, что надёжность изоляции машин ниже при воздействии эксплуатационных факторов и выше при воздействии конструкторских и производственных факторов.

Вторая особенность – когда из-за недостаточного качества проектирования и технологии изготовления, т.е. при $\lambda_k > \lambda_э$ имеем условия прохождения дефектных АД в эксплуатацию. При этом примем, что в эксплуатации строго соблюдаются технические условия.

И последнее, третье условие, когда $\lambda_\delta = \lambda_k = \lambda_э$, т.е. практически отсутствуют случаи прохождения АД в эксплуатацию с дефектами, при этом выполняются ТУ на эксплуатацию. Этот вариант является наиболее благоприятным, характеристики надёжности АД соответствуют расчётным λ_δ, которые были заданы в ТЗ на проектирование.

Исследования показывают, что на практике наиболее вероятным случаем является первый, хотя не исключаются второй и третий варианты. Это можно объяснить тем, что на этапах разработки ТЗ, эскизного проекта, рабочих чертежей, изготовления и доработки конструкции АД участвуют специалисты, имеющие высокий уровень образования и опыта.

Несмотря на то, что интенсивность отказов считается постоянной в период установившегося износа деталей и узлов АД, в силу воздействия эксплуатационных факторов происходит старение изоляции. Поэтому для λ_i необходимо принимать усредненное значение, которое представляет собой среднеарифметическую сумму начального и конечного значений.

Из приведенных графических зависимостей видно, как интенсивность отказов может влиять на ВБР АД: с увеличением λ_i снижается ВБР элементов двигателей. Тогда на этапе проектирования для конкретного значения $P_i(t)$ (рис. 1) можно определить характеристику $\lambda_i(t)$ (рис. 2). Величина интенсивности отказов изоляции в эксплуатации может зависеть как от внешних факторов, таких как температура, влажность, вибрация и др., так и от внутренних – нагрузка, количество пусков и остановов и др.

Безусловно, указанные факторы увеличивают интенсивность отказов, если режимы работы двигателя могут изменяться в широких диапазонах.

Расчёты параметров надёжности показывают, что в проектировании и эксплуатации АД необходимо добиваться того, чтобы интенсивность отказов асимптотически стремилась к нулю. В этом случае при Пуассоновском потоке отказов можно считать, что вероятность безотказной работы будет близка к 0,98.

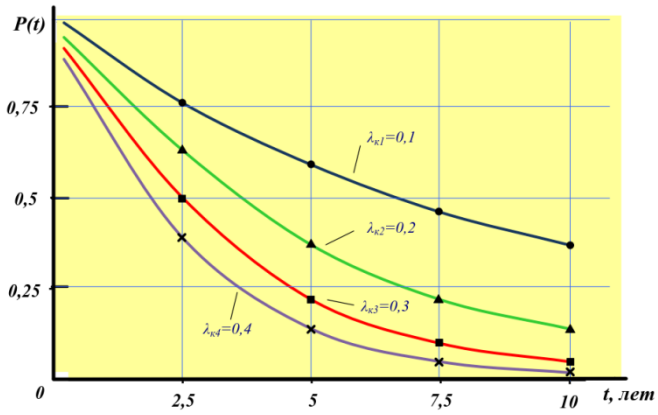

Рис. 2. Характеристики надёжности изоляции паза статора АД для различных интенсивностей отказов

На основании результатов проведённых аналитических и экспериментальных исследований, анализа и классификации элементной базы АД по конструктивному признаку установлены законы функций плотности распределения нагрузок и надёжности. Предложенные методы и алгоритмы расчётов для детального структурного анализа конструкций узлов с учётом элементной базы системы позволяют определить рациональные уровни надёжности на этапе их проектирования.

Для обмотки статора АД установлены следующие характеристики: наибольшую интенсивность отказов имеют случаи пробоя изоляции катушки паза – λ=0,035 1/год, наименьшую интенсивность имеют повреждения витковой изоляции и случаи пробоя изоляции на корпус (паз) – λ=0,027 1/год.

Summary

The article deals with the research and development of methods of calculation of reliability characteristics of windings of induction motors. A method for evaluating the reliability of the parameters of induction motors. We obtain a graph of the probability of failure-free operation of parts and units of asynchronous motors. Calculated data is the failure rate of the stator groove elements. The results can be used in the design phase asynchronous motors, as well as in service to optimize the system of preventive maintenance of induction motors.

Keywords: induction: induction motors, the characteristics of reliability, the probability of failure-free operation, intensity of failures.

Литература:

1. Нечипоренко В.И. Структурный анализ систем / В.И. Нечипоренко. М.: Советское радио, 1977. 214 с.

2. Попов А.В. Исследование и совершенствование методов расчета надежности элементов электротехнических комплексов и систем / А.В. Попов // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2015. № 3−4. С. 114−123.

3. Котеленец Н.Ф. Испытания и надёжность электрических машин / Н.Ф. Котеленец, Н.Л. Кузнецов. М.: Высшая школа, 1988. 232 с.

4. Барлоу Р. Статистическая теория надёжности и испытания на безотказность / Р. Барлоу, Ф. Прошан. М.: Наука, 1984. 326 с.

Поступила в редакцию ***20 июня 2016 г.***

Попов Александр Владимирович – зам. главного энергетика ПАО «Нижнекамскнефтехим». Тел.: 8(8555)377089. E-mail: Popovav@nknh.ru.

© Проблемы энергетики, 2016, № 5-6

Идиятуллин Ринат Гайсович – д-р техн. наук, профессор Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел.: 8-960-034-96-18. E-mail: mcelt@rambler.ru.

Аухадеев Авер Эрикович – канд. техн. наук, доцент Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел.: 8-927-418-88-88. E-mail: auhadeevkgma@rambler.ru.