

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ИЗОЛЯЦИЮ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Е.О. Мартко

В данной статье приведены причины выхода из строя электродвигателей, в частности дефекты, возникающие в изоляции. Проведен анализ внешних факторов, оказывающих негативное влияние на изоляцию электродвигателей, дана их классификация. Рассмотрены законы распределения данных факторов.

Ключевые слова: электродвигатель, диагностика, межвитковая изоляция, факторы, закон распределения.

В настоящее время двигатели переменного тока являются крупнейшими потребителями электрической энергии. Согласно последним исследованиям, они потребляют свыше 80 % всей вырабатываемой в стране электроэнергии. Однако в процессе эксплуатации по различным причинам могут возникать повреждения элементов двигателя, что в свою очередь приводит к преждевременному выходу его из строя. Исходя из многочисленных данных полученных в ходе исследований характера повреждений двигателей переменного тока были получены следующие статистические данные повреждений элементов [1–3]:

- подшипников – 40 %;
- статора – 38 %;
- ротора – 10 %;
- другие повреждения – 12 %.

Выход из строя электродвигателя (ЭД) наносит большой ущерб предприятиям агропромышленного комплекса. Специфика сельскохозяйственных предприятий связана с процессом жизнеобеспечения биологических объектов, а, следовательно, срыв технологических операций из-за отказа ЭД приводит к дискомфорту скота, заболеваниям и сниже-

нию продуктивности. Также в связи с выходом из строя ЭД происходит простой технологического оборудования и (или) порча продукции, данный ущерб является основным. Помимо основного ущерба предприятию возможно возникновение дополнительных убытков – снижение электро- и пожаробезопасности, связанное с возможными короткими замыканиями, которые могут присутствовать в обмотке статора или ротора поврежденного ЭД.

На основе статистических данных по отходам ЭД, полученных из многочисленных исследований, была построена линейчатая диаграмма, показанная на рисунке 1 [4]. Горизонтальными столбцами на ней представлен средний ресурс ЭД (математические ожидания) по технологическим процессам и отраслям сельского хозяйства, условной плоскостью – расчетный ресурс, составляющий согласно нормам амортизационных отчислений не менее 8 лет. Как видно, действительный средний ресурс ЭД ниже расчетного в 2,5...3,5 раза, при этом двигатель, срок службы которого превышает математическое ожидание, может рассматриваться в состоянии повышенного отработанного ресурса.

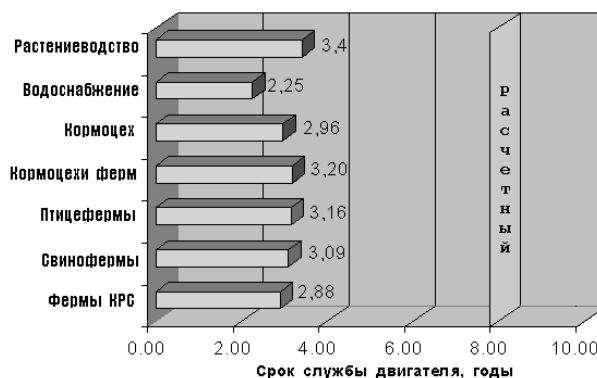


Рисунок 1 – Срок службы электродвигателя в сельском хозяйстве

По результатам статистики на сегодняшний день в результате повреждений изоляции и возникновения коротких замыканий в обмотке выходит из строя до 80 % ЭД. Межвитковая изоляция является слабым элементом конструкции низковольтных двигателей. Ее уязвимость обусловлена входением в механическую систему, состоящую из разнородных элементов:

- полимерные изоляционные материалы;
- медь проводников.

Деформации происходят при изменении температуры, электродинамических усилиях, вибрациях обмотки, приводящих к развитию внутренних напряжений в изоляции и, как следствие, образованию усталостных дефектов. В свою очередь, вид развивающихся повреждений зависит от внешних эксплуатационных факторов и внутренних особенностей системы изоляции ЭД [4].

Оценка состояния ЭД, как объекта, сводится, главным образом, к оценке состояния наиболее важных с точки зрения надёжности его частей. Получение информации о состоянии обмотки статора ЭД, как результата диагностики, есть нечто отличное от оценки состояния электрической изоляции.

Анализ существующих способов и методов диагностики показал, что особенности дефектообразования при диагностике состояния ЭД не всегда учитываются, поскольку современные способы не обладают избирательной чувствительностью и не могут дать достоверных результатов.

В работе [4] был подробно освещен автором вопрос, касающийся методов диагностики ЭД, в частности построена схема дефектов изоляции, приведенная на рисунке 2.

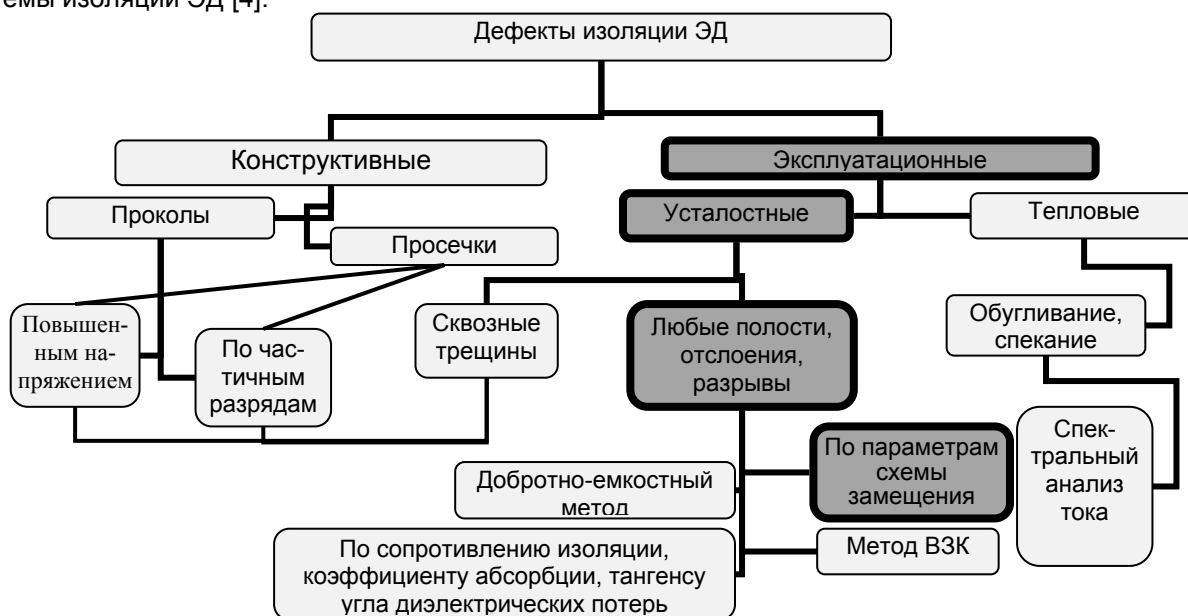


Рисунок 2 – Структурно-логическая схема дефектов изоляции и методов диагностики

При рассмотрении ЭД как системы возможно графическое представление данной системы в виде «черного ящика», представленного на рисунке 3.

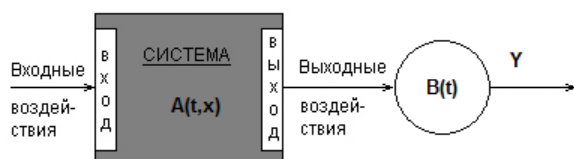


Рисунок 3 – Модель «черного ящика»

Оператор $A(t,x)$ – функция случайных параметров X , отражающих структурные изменения в диагностируемом объекте – любые полости, отслоения и разрывы. Далее выходные параметры преобразуются, и получаемый сигнал состоит из различных помех и собственно ожидаемого сигнала $B(t)$, далее выделяется и принимается рандомизированного решения Y .

С информационной точки зрения задача измерения случайного параметра представляет собой абстрактную задачу преобразования сигнала $B(t)$ в диагностическое решение Y .

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ИЗОЛЯЦИЮ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Для того чтобы выбрать некоторый единый (обобщающий) показатель качества изоляции, необходимо проанализировать изменяющиеся параметры электроизоляционной системы обмоток статора. На рисунке 4 представлена схема замещения обмотки ЭД [5].

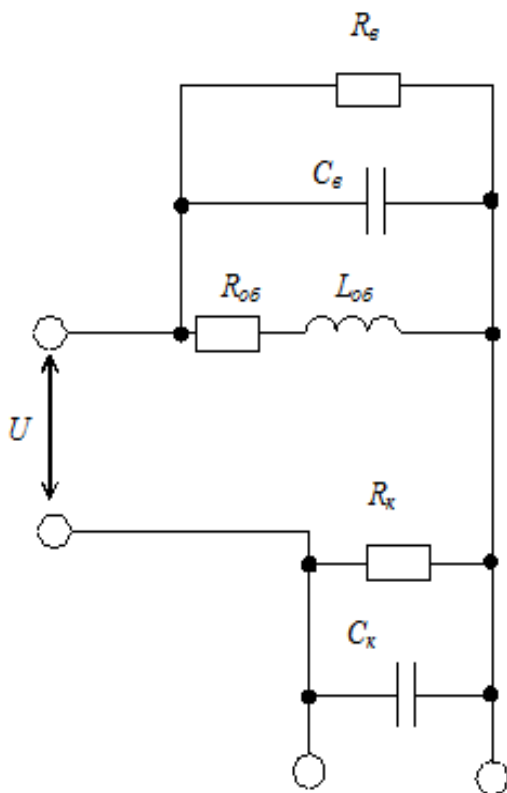


Рисунок 4 – Схема замещения обмотки электродвигателя

R_ϵ – межвитковое сопротивление; C_ϵ – межвитковая ёмкость; $R_{об}$ – активное сопротивление обмотки; $L_{об}$ – индуктивность обмотки; R_κ – сопротивление изоляции обмотки относительно корпуса; C_κ – ёмкость изоляции обмотки относительно корпуса

В данной схеме замещения $R_{об}$ и $L_{об}$ являются неизменяемыми. Они зависят от конструктивных особенностей и на протяжении всего жизненного цикла не могут быть изменены без проведения капитального ремонта. Параметры электроизоляционной системы R_ϵ , C_ϵ , R_κ и C_κ изменяются на протяжении жизненного цикла, о чём свидетельствует анализ ряда работ.

Соответственно, на R_κ , R_ϵ (как следствие), влияние оказывают все входные факторы, начиная от климатических и заканчивая электрическими, влияющие на выходные параметры ЭД.

В таблице 1 приведены внешние воздействующие факторы, влияющие непосредственно на сопротивление корпусной изоляции и межвиткового сопротивления R_κ , R_ϵ , [6].

В результате анализа внешних воздействий на ЭД, можно выделить две общие группы, которые будут влиять на его выходные параметры:

- первая группа объединяет метеорологические характеристики, основными из которых является температура окружающей среды, скорость ветра, влажность воздуха.

- вторая группа – параметры, основными из которых являются значение напряжения, питающее ЭД и величина протекающего в ней тока и его частота.

Рассмотрим законы распределения для некоторых факторов, влияющих на работу ЭД, приведенных в таблице 1.

В работе [6] предложена обобщенная методика для выбора функции плотности вероятности для входных параметров и на ее основе получены законы распределения основных метеорологических характеристик в некоторых районах Алтайского края.

Для метеорологических характеристик: температуры окружающей среды, скорости ветра и влажности воздуха, – для различных районов Алтайского края получены статистические модели распределения этих параметров.

Закон распределения размеров частиц, наиболее полно соответствующий действительным распределениям измельченных материалов, был получен еще в 1941 г. академиком А.Н. Колмогоровым [8].

А.Н. Колмогоров математически обосновал некоторую общую схему процесса измельчения, при которой плотность распределения размеров частиц по мере измельчения асимптотически стремится к логарифмически нормальному закону. Он предположил, что распределение логарифмов размеров частиц не зависит от абсолютных размеров частиц исходного материала. При этом не только линейные размеры частиц подчиняются этому закону, но и любые другие характеристики частиц, зависящие от размера [7]

$$\frac{dD}{dx} = f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi \ln a}} \cdot \frac{1}{x} \exp \left[-\frac{(\ln x - \ln x_0)^2}{2 \ln^2 \sigma} \right], \quad (4)$$

а интегральная функция логарифмически нормального распределения имеет вид:

МАРТКО Е.О.

Таблица 1 – Факторы, влияющие на сопротивление корпусной изоляции и межвитковое сопротивление электродвигателя

Фактор		Диапазон	Влияние на R_k, R_e
1		2	3
температура в течение года		-39 до 39 °С	- в полимерной изоляции происходят физические и химические изменения, возникают термомеханические напряжения, которые приводят к частичному или полному разрушению материала, имеющему меньшую прочность, например, полимерных составляющих изоляции обмоток;
			- при одновременном воздействии повышенной температуры и высокой влажности воздуха возникает интенсивная коррозия металлов, интенсифицируется рост плесневых грибов, выделения которых активизируют процессы коррозии;
			- тепловое старение приводит к значительному уменьшению сопротивления изоляции и электрической прочности, снижению прилипания плёнок эмаль-лаков к проводам в системах изоляции электрических машин, ухудшению стойкости изоляции к химически активным средам;
			- увеличение температуры окружающей среды вызывает ухудшение охлаждения электродвигателей, вследствие чего возникает рост потерь в обмотках.
содержание пыли:	животно-водческие помещения	3...6 мг/м ³	- оседание пыли на обмотку и другие конструктивные элементы ЭД вызывает снижение теплоотдачи и возникновение повышенного нагрева; - из-за ударов абразивных частиц в местах, где воздушный поток имеет наибольшую скорость, наблюдается наиболее сильная эрозия изоляции; - в некоторых случаях пыль способствует увлажнению обмоток, создаёт токопроводящие мостики между токоведущими частями, что может привести к поверхностному разрушению материала, замыканию токоведущих частей или пробую изоляции.
	птичники	10...20 мг/м ³	
	элеваторы, мельницы и т. п.	0,24...240 мг/м ³	
относительная влажность (влага)		от 18 до 100 %	- в процессе увлажнения (поглощении или конденсации влаги) снижается объёмное и, особенно, поверхностное сопротивление растёт тангенс угла диэлектрических потерь и несколько повышается диэлектрическая проницаемость, повышается отношение ёмкостей, снижается электрическая прочность изоляционного материала.
относительная влажность (влага)		от 18 до 100 %	- вода, вступая в химическую реакцию с некоторыми веществами, образует электролиты и становится хорошим проводником электрического тока, усиливая своё разрушающее действие на изоляцию; - усиливается влияние ионизационных явлений; - под воздействием влаги может происходить гидролитическое разрушение изоляционных материалов, заключающееся в расщеплении полимерных цепей; - воздействие влаги приводит к размягчению некоторых изоляционных материалов, которые могут даже переходить в жидкое состояние. При этом выделяются органические кислоты, которые разрушают другие органические материалы и способствуют интенсивной коррозии металла; - происходят химические изменения в полимерной изоляции обмоток; - проникновение влаги вызывает гидролитическое разрушение изоляционных материалов, особенно имеющих волокнистую структуру. Периодическое проникновение влаги в изоляцию и её удаление подсушкой во время работы электрических машин способствует развитию пор в изоляции; - при увлажнении резко снижается напряжение пробоя в местах дефектов и тем самым создаются условия для возникновения дуговых разрядов при сравнительно низких перенапряжениях.
содержание аммиака и сероводорода		10...30 мг/м ³	- агрессивные газы могут химически взаимодействовать с изоляционным материалом, что приводит к ускоренному снижению электрической прочности изоляции, сокращению срока ее службы;
содержание углекислого газа		0,24...240 мг/м ³	

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ИЗОЛЯЦИЮ
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Продолжение таблицы 1

1	2	3
напряжение	от - 5 % до +10 % $U_{ном}$	- коррозия изоляции обмоток за счёт пустотных электрических разрядов;
		- при возникновении перенапряжения – мгновенное разрушение изоляции за счёт пробоя;
		- из-за значительной протяженности сельских сетей, наличия большого количества однофазных потребителей и неравномерного их распределения по фазам в электрических сетях имеет место значительная несимметрия напряжения (от 0,3 до 2,5 %), существенные его колебания (от -25 до 20 % от номинального);
		- нарушение симметрии напряжения сети вызывает перегрев обмотки статора, а также дополнительную вибрацию ЭД, вследствие чего сокращается срок службы обмоток;
		- при работе ЭД на пониженном напряжении ($\delta U = -5\%$), происходит ускоренный износ изоляции обмоток, что сокращает срок службы изоляции ЭД (в 1,5 раза)

Функция плотности логарифмически нормального распределения выражается

$$D(x) = F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \ln \sigma} \cdot \int_{-\infty}^{\ln x} \exp\left[-\frac{(\ln x - \ln x_0)^2}{2 \ln^2 \sigma}\right] d(\ln x) \quad (5)$$

где $\frac{dD}{dx}$ – частота наблюдения величины x ;

x – размер частиц;

x_0 – медиана распределения;

σ – стандартное отклонение (среднее квадратическое). Медианой распределения с плотностью $f(x)$ называют такое значение $x = x_0$, при котором справедливо равенство

$$\int_0^{x_0} f(x) dx = \int_{x_0}^{\infty} f(x) dx$$

то есть половина всех частиц имеет размер больше x_0 , другая половина – меньше x_0

$$\ln x_0 = \frac{\sum g \ln x}{\sum g} = \frac{g_1 \ln x_1 + g_2 \ln x_2 + \dots + g_n \ln x_n}{\sum g}$$

то есть x_0 есть среднее геометрическое размеров частиц. Здесь g – вес фракции.

Дисперсия в логарифмически нормальном распределении характеризует размытость функции $f(x)$ относительно максимума и может быть названа степенью полидисперсности измельченного материала. Чем

больше величина дисперсии, тем больше размытость данного распределения.

$$\ln \sigma = \sqrt{\frac{g(\ln x - \ln x_0)^2}{\sum g}} \quad (5.1)$$

то есть $\ln \sigma$ – есть стандартное отклонение от среднего геометрического размера.

Интеграл в правой части уравнения (5) не выражается через элементарные функции. Произведя замену переменных в виде

$$t = \frac{\ln x - \ln x_0}{\ln \sigma} \quad (6)$$

получим

$$F(x) = \Phi\left(\frac{\ln x - \ln x_0}{\ln \sigma}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t \exp\left[-\frac{t^2}{2}\right] dt \quad (7)$$

Величину t называют нормированной величиной. Функция $\Phi(t)$ табулирована. Табулированы также функция Лапласа

$$\Phi_0\left(\frac{\ln x - \ln x_0}{\ln \sigma}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-t}^t \exp\left[-\frac{t^2}{2}\right] dt$$

и функция Крампа

$$\operatorname{erf}\left(\frac{\ln x - \ln x_0}{\sqrt{2} \ln \sigma}\right) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^t \exp[-t^2] dt,$$

связанные с функцией $\Phi(t)$ следующим образом:

$$\Phi(t) = 0,5[1 + \Phi_0(t)] = 0,5[1 + \operatorname{erf}(\sqrt{2}t)].$$

Величину t нормированного распределения называют квантилью. Квантиль t изменя-

ется от $-\infty$ до $+\infty$, тогда как $\Phi(t)$ от 0 до 1.

Из уравнения (6) находим

$$\ln x = -\ln x_0 - t \ln \sigma.$$

Это уравнение указывает, что $\ln x$ есть функция соответствующего значения t в уравнении (7). Если в прямоугольных координатах по оси абсцисс отложить значения $\lg x$, а по оси ординат значения t , будет получена прямая линия – диаграмма квантилей. На ось абсцисс удобнее нанести логарифмическую шкалу, а на ось ординат – вероятностную шкалу. В результате получена вероятностно-логарифмическая сетка. Ее применение упрощает проверку применимости логарифмически нормального закона. Любое отклонение опытных точек от прямой укажет на систематическое влияние какой-либо причины, регулирующей распределение частиц.

По словам профессора Н.А. Фукса [8]: логарифмически нормальное распределение – это пока единственное распределение, которое может быть получено теоретически для систем, образующихся при длительном диспергировании. По ряду причин, главным образом из-за отсутствия соответствующей литературы, универсальность этого закона распределения остается неизвестной многим специалистам, работающим с различными дисперсными системами, что усложняет проводимую ими работу.

Результаты, приведенные в данной работе, были и будут применены в дальнейшем для решения научных и практических задач, в частности при создании и построении математической модели работы ЭД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. W. T. Thomson : "A Review of On-Line Condition Monitoring Techniques for Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motors-Past Present and Fu-

ture" Keynote address at IEEE Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives, Gijon, Spain, Sept. 1999 pp 3-18.

2. EPRI: "Improved Motors for Utility Applications and Improved Motors for Utility Applications, Industry Assessment Study", Vol 1, EPRI EL-2678, Vol 1 1763-1, final report and EPRI EL-2678, Vol 2, 1763-1 final report October 1982

3. Грундулис, А.О. Защита электродвигателей в сельском хозяйстве [Текст] / А.О. Грундулис. – М.: Колос, 1982. – 140 с.

4. Пахомов, А.И. Методы и средства диагностики изоляции асинхронных двигателей сельскохозяйственного производства на основе частичных разрядов: дис.... канд. техн. наук. – Краснодар, 2008. – 347с.

5. Грибанов, А.А. Обоснование параметров технико – экономических процессов пропитки и сушки изоляции асинхронных электродвигателей, испытываемых в агропромышленном комплексе: дис.... канд. техн. наук. – Барнаул, 1999. – 198 с.

6. Хомутов, О.И. Вероятностный подход к факторам, влияющим на работу электроустановок, На примере ВЛЭП и ЭД // Ползуновский вестник / О.И. Хомутов, И.В. Белицын, Е.О. Мартко, А.В. Макаров, Р.С. Старухин. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2007. – № 4. – с. 215–223.

7. Самсонов, В.Т. О законе распределения размеров частиц пыли // Научные работы институтов охраны труда ВЦСПС / В.Т Самсонов. – М, 1964. – С. 26-39.

8. Пономарев, Н.Н. Исследование дисперсного состава пылей в связи с оценкой работы воздухоочистителей. Труды НАМИ. – Вып. 42. – 1961.

9. Мартко, Е.О. Сингулярный спектральный анализ как метод моделирования электрической нагрузки / Е.О. Мартко, И.В. Белицын // Ползуновский вестник. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ. 2009. – № 4. – С. 76-86.

Мартко Е.О., аспирант, каф. «Электроснабжение промышленных предприятий», АлтГТУ им. И.И. Ползунова, тел. 8(3852) 29-07-76, E-mail: martnight@mail.ru