

## МОДЕЛИ НАДЕЖНОСТИ И ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЫХОДА ИХ ИЗ СТРОЯ

Е. О. Мартко

*В статье рассмотрены основные модели надежности и технического состояния изоляции электродвигателей, используемые для прогнозирования выхода их из строя.*

*Ключевые слова: модель, двигатель, изоляция, температура.*

В 1930 г. Монтзингер на основании своих опытов и опытов других авторов предложил простое правило, получившее название «правило восьми градусов», для определения срока службы изоляции класса А (бумага, пряжа, шелк): при вполне определенном неизменном приращении температуры  $A_0$  срок службы уменьшается в 2 раза [1].

Это правило выражается формулой

$$D_{\vartheta} = A_0 2^{-\frac{\vartheta}{\Delta\vartheta}},$$

где  $D_{\vartheta}$  – срок службы двигателя при неизменной температуре  $\vartheta$ ;

$A_0$  – срок службы при  $\vartheta = 0^{\circ}\text{C}$ .

Эта формула также называется правилом восьми градусов. По Монтзингеру температура принимается от 5 до 10 °С, среднюю температуру принимают равной 8 °С.

Связь между сроком службы изоляции и рабочей температурой имеет логарифмический характер, и если по одной оси откладывать температуру в линейном масштабе, а по другой – срок службы в логарифмическом масштабе, то зависимость представляется прямой.

Стоит отметить, что правило Монтзингера нельзя рассматривать как закон, имеющий универсальное значение в том смысле, например, что машина с изоляцией класса А после длительной работы, соответствующей температуре изоляции, равной 105 °С, выйдет из строя из-за повреждения изоляции в точности через 7 лет. В действительности, указания, сделанные по вопросу относительно старения, разрушения и срока службы, вовсе не позволяют рассчитывать на такую однозначность. Последнее обстоятельство ни в коей мере не ограничивает практическое значение правила Монтзингера. Точное значение *срока старения* скорее следует искать в статистических закономерностях. Так, например, если нужно сделать выбор или спроектировать серию ма-

шин на максимальную температуру 95 °С или 103 °С, то сразу можно с достоверностью утверждать, что машины, рассчитанные на большую температуру, будут в среднем иметь вдвое меньший срок службы. Таким образом, правило Монтзингера позволяет установить среднее относительное изменение срока службы, при определенном увеличении температуры на протяжении определенного промежутка времени [2, 3].

Анализ работ [4, 5] позволяет судить о предложенной обобщенной модели электрического и теплового старения электрической изоляции. Данная модель рассматривает с единых позиций диэлектрики, характеризующиеся как наличием, так и отсутствием пороговых значений воздействующих факторов. В данных работах определены новые функциональные определения «порогового»/«беспорогового» диэлектрика и устанавливает соотношения между электрическим и тепловым порогами.

В знаменателе формулы произвольной структуры, описывающей зависимость ресурса электроизоляции от напряженности электрического поля  $E$  и температуры  $T$ , вводится дополнительный множитель, обращающийся в 1 для «беспорогового» диэлектрика и стремящийся к нулю в обратном случае, при стремлении факторов к тепловым порогам. Общая модель получена путем объединения известных частных моделей и содержит 7 эмпирических коэффициентов.

Модели электрического и многофакторного старения диэлектриков, которые учитывают существование критического уровня напряженности, рассматриваются в работе [6]. При разработке данных моделей был использован статистический подход, в основу рассматриваемого семейства математических моделей старения твердых диэлектриков под действием электрического поля и повышенной температуры положено объединение

## МОДЕЛИ НАДЕЖНОСТИ И ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЫХОДА ИХ ИЗ СТРОЯ

двухпараметрического распределения Вейбулла для времени отказа и детерминированных трех- и четырехпараметрических зависимостей ресурса от температуры и напряженности электрического поля. При этом фактор температуры учитывается соотношением Аррениуса или Эйринга, а фактор напряженности электрического поля степенной или экспоненциальной зависимостью. Для оценки параметров распределения предложены методы максимального правдоподобия и наименьших квадратов. В целом четырехпараметрические модели значительно лучше соответствуют опытным данным, чем трехпараметрические, в том числе при 10 %-ной и 90 %-ной вероятности отказа.

Модели [7] дают хороший результат при прогнозировании технического состояния изоляции электродвигателя. При использовании данной модели необходимо каждый раз заново идентифицировать не только коэффициенты зависимости, но и структуру самой модели для каждого нового двигателя, эксплуатируемого в конкретных условиях. Данный факт доказывает неудобство использования модели, а также стоит добавить, что это представляет определенные трудности в вычислительном плане.

В работах [8-12] используется вибрационный способ оценки технического состояния электродвигателя. Суть заключается в том, что специальными датчиками регистрируются и анализируются сигналы, порождаемые вибрацией электродвигателя. В дальнейшем происходит анализ формы и амплитуды полученных сигналов, сравнение их с предыдущими данными, вследствие чего определяется возможное дальнейшее использование двигателя. Данные модели имеют существенные недостатки – измерения, необходимые в данном случае, очень громоздки и сложны, вдобавок работа возможна непосредственно рядом с оборудованием.

В работах [13-16] рассматривается моделирование на основе спектр-токового анализа. Данный способ позволяет диагностировать электродвигатель и связанные с ним механические устройства. В течение заданного интервала времени производят запись значений токов, потребляемых электродвигателем, выделяют анализируемые характерные частоты, преобразуют полученный сигнал из аналоговой в цифровую форму. Затем осуществляется спектральный анализ полученного сигнала и сравнение значений амплитуд на характерных частотах с уровнем сигнала на частоте питающей сети. Достоин-

ством способа является дистанционное проведение измерений, причем возможность снятия измерений на работающем двигателе. Но при этом есть весомый недостаток – очень сложно оценить результаты. Причины таковы: амплитудномодулируемая частота  $f$  учитывается в спектре дважды, по обе стороны питающего напряжения  $f_b$ . В таком случае происходит удваивание модулируемой частоты (она считается дважды), вследствие чего точность диагностирования падает, а также отсутствует возможность увеличения числа анализируемых гармоник частоты  $f$ . Вместе с тем метод спектрального анализа требует доработки для устранения присущих ему недостатков, связанных с невозможностью проведения диагностики электродвигателя с меняющимся во времени режимом работы.

Модель «слабейшего звена» нашла широкое применение при исследовании электрических машин на надежность, в частности при создании моделей надежности тех или иных узлов электрических машин.

Примером использования данного метода является модель надежности статорных обмоток асинхронных двигателей, разработанная О. Д. Гольдбергом [17, 18]. Модель «слабейшего звена» представляет собой систему с последовательным соединением элементов, в которой при отказе одного элемента выходит из строя вся цепь.

При формулировании проблемы в общем виде – определение вероятности безотказной работы цепи или системы, блока или элемента, когда приложенные напряжения превышают прочность – принципиального различия нет: рассматриваются ли механические напряжения и прочность (при исследовании механических узлов) или электрические напряжения и диэлектрическая прочность.

Вводятся обозначения:

$f(u)$  – плотность распределения напряжения  $u$ ;

$f(U)$  – плотность распределения прочности.

Если  $U > u$ , то разрушения материала не произойдет.

Вероятность безотказной работы элемента:

$$P_y = P(U > u). \quad (1)$$

Область перекрытия кривых  $f(U)$  и  $f(u)$  на рисунке 1 заштрихована, она характеризуется определенной вероятностью отказа. Рассматривается интервал  $du$  в области перекрытия. Вероятность нахождения в этом интервале определенного значения напряжения равна площади элемента  $du$ .

МАРТКО Е. О.

$$P\left(u^* - \frac{du}{2} \leq u \leq u^* + \frac{du}{2}\right) = f(u^*)du, \quad (2)$$

где  $u^*$  – значение напряжения в середине интервала  $du$ .

Вероятность того, что прочность  $U$  превышает некоторое значение напряжения  $u^*$ :

$$P(U > u^*) = \int_{u^*}^{\infty} f(U)dU. \quad (3)$$

Выражение (4) – произведение вероятностей, оно является вероятностью того, что значение напряжения заключено в интервале  $du$ , а прочность  $U$  превышает напряжение, задаваемое этим интервалом:

$$f(u^*)du \int_{u^*}^{\infty} f(U)dU, \quad (4)$$

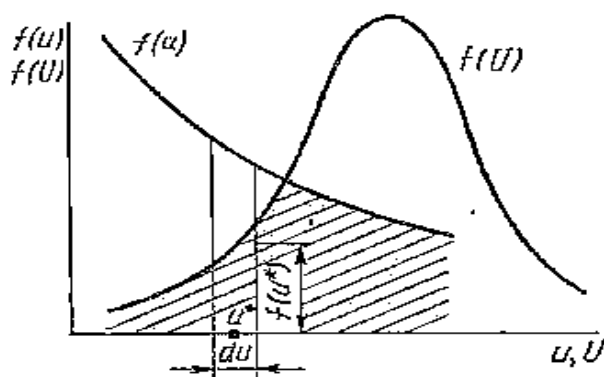


Рисунок 1 – Перекрывание распределения напряжений  $f(u)$  и прочности  $f(U)$

В данном случае вероятность безотказной работы – это вероятность того, что прочность  $U$  превышает напряжение и для всех возможных значений напряжения:

$$P = \int_{-\infty}^{\infty} f(u) \left[ \int_u^{\infty} f(U)dU \right] du. \quad (5)$$

Выражение (5) характеризует наиболее общий случай.

Теперь перейдем к модели «слабейшего звена» – системы с последовательно соединенными элементами. Например, возьмем обмотку электрической машины, представленную в виде цепи из  $n$  идентичных элементов. Изоляция этой обмотки подвергается воздействию приложенного напряжения (считаем, что отказом является пробой изоляции). В этом случае элемент цепи, имеющий наименьшую диэлектрическую прочность, выйдет из строя первым, и вероятность безотказной работы системы:

$$P_0 = \min P_i,$$

где  $P_i$  – вероятность безотказной работы  $i$ -го элемента.

В итоге система, состоящая из  $n$  элементов, выходит из строя, когда на одном из элементов приложенное напряжение превышает прочность – данная ситуация была рассмотрена выше. Вероятность безотказной

работы любого элемента определится по формуле (5) или, если взять пределы интегрирования от 0 до  $\infty$ ,

$$P_i = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} f(u)f(U)dUdu. \quad (6)$$

Выражение (6) можно записать с использованием интегральной функции распределения  $F(U)$ :

$$P_i = \int_0^{\infty} f(u)[1 - F(U)]du. \quad (7)$$

Тогда если цепь состоит из  $n$  случайно выбранных элементов, это эквивалентно выбору  $n$  случайных значений прочности из совокупности с распределением  $f(U)$ . Вводим обозначение  $U_n$  – случайная величина, показывающая прочность цепи, состоящей из  $n$  элементов. Тогда

$$U_n = \min(U_i),$$

где  $(U_i)$  – прочность  $i$ -го элемента.

В соответствии с распределением экстремальных значений:

$$G(U_n) = 1 - [1 - F(U_n)]^n,$$

где  $G(U_n)$  – функция распределения прочности цепи.

## МОДЕЛИ НАДЕЖНОСТИ И ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЫХОДА ИХ ИЗ СТРОЯ

Для этой модели «слабейшего звена» вероятность безотказной работы системы принимает вид:  $P_n = P(U_n > u)$ . Используя выражение. (7):

$$P_n = \int_0^{\infty} f(u)[1 - F(U)]^n du. \quad (8)$$

Таким образом, была получена формула (8), которая представляет собой вероятность безотказной работы всей системы, записанную через число элементов  $n$ , плотность распределения нагрузки  $f(u)$ , действующей на систему, и распределение прочности  $F(U)$ .

Для получения математической модели, пригодной для расчета надежности обмотки, необходимо знать реальные распределения пробивных напряжений межвитковой изоляции и приложенных напряжений, а также характер изменения случайной функции распределения пробивных напряжений межвитковой изоляции в функции времени. Данные получают экспериментальным путем, но эксплуатационные факторы учитываются путем варьирования статистик распределения пробивного напряжения как функции времени эксплуатации [17].

Одним из основных весомых недостатков модели является высокая трудоемкость при определении кривой распределения пробивных напряжений изоляции двух соприкасающихся витков, для построения которой требуется испытать на пробой 104–106 пар проводников.

Несмотря на то, что визуальный способ идентификации в настоящее время является достаточно гибким, тем не менее, очень часто возникает необходимость в автоматизации процесса выделения компонент ряда, даже с потерей качества. Поэтому одним из наиболее распространенных направлений развития метода считается автоматизация процедуры идентификации (группировки) [19-20].

Основная идея метода состоит в представлении временного ряда в виде последовательности векторов достаточно большой размерности с дальнейшим анализом линейной структуры их совокупности как реализации многомерной случайной величины с помощью метода главных компонент [21].

Такой анализ дает фактически разложение исходной функции, порождающей временной ряд, в аналог ряда Фурье по базису, порожденному самой функцией. В случае вырожденности системы многомерных векторов можно утверждать о существовании внутренних линейных связей между значениями процесса. Формально это выражается в том, что

временной ряд удовлетворяет линейному разностному уравнению с постоянными коэффициентами. Это представление позволяет естественным образом строить прогноз исходного ряда и анализировать многомерные временные ряды. Для временных рядов, полученных из периодических функций, метод дает результаты, близкие к результатам гармонического анализа Фурье. Для достаточно длинных рядов со случайной составляющей метод ведет себя аналогично линейному согласованному фильтру, настроенному на стохастическую структуру исходного ряда и позволяет выделять медленные тренды и обнаруживать изменения внутренней структуры исходного процесса. Таким образом, электрическая нагрузка может быть представлена в виде суммы полиномиальных, экспоненциальных и периодических составляющих на фоне шума.

К одному из неоспоримых достоинств выбранного метода следует отнести отсутствие требования априорного знания модели ряда, что практически не влияет на качество полученных результатов. А также данный метод позволяет работать с модулированными гармониками, в отличие от методов, основанных на методе Фурье.

Результатом работы является методика, разработанная на основе математической модели анализа сингулярного спектра. Достоинствами методики являются ее низкие трудозатраты и денежные вложения, а поскольку достаточно часто появляется возможность выделить отдельные компоненты исходного ряда: не только различные колебательные движения, но и такие важные для нас компоненты, как шум и тренд, то вероятность безотказной работы системы определяется с наибольшей точностью.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хвостов, В. С. Электрические машины: Машины постоянного тока : Учебник для электромеханических специальностей вузов [Текст] / В. С. Хвостов. – М. : Высшая школа, 1988. – 336 с.
2. Готтер, Г. Нагревание и охлаждение электрических машин [Текст] / Г. Готтер. – М. – Л. : Госэнергоиздат, 1961. – 480 с.
3. Montanari, G. C. Life models for insulating materials and systems with electrical life lines tending to threshold // Conf. Rec. IEEE Int. Symp. Elec. Insul. – Baltimore, Md, Inne 7–10, 1992. – Piscataway (N.J.). – С. 40-43.
4. A general multi-stress life model for insulating materials with or without evidense for thresholds / L. Simoni, G. Mazzanti, G. C. Montanari, L. Lefebvre

// IEEE Trans. Elec. Insul. – 1993. – 28№3. – С. 349–364.

5. Cacciari, M. Electrical life threshold node 1 s for solid insulating materials subjected to electrical and multiple stresses : Probabilistic approach to generalized life models / M. Cacciari, G.C. Montanari // IEEE Trans Elec. Insul. – 1992. – 27№5. – С. 987–999.

6. Хомутов, О. И. Исследование эксплуатационной надёжности электродвигателей в условиях комплексов крупного рогатого скота: Дис. ... канд. техн. наук. – Челябинск: 1977. – 192 с.

7. Вибрационная диагностика электрических машин в установившихся режимах работы: методические указания [Текст] / А. В. Барков, Н. А. Баркова, А. А. Борисов. – СПб. : Северо-Западный учебный центр, 2006. – 20 с.

8. Лукьянов, М. М. Новые принципы виброакустической диагностики изношенного силового электрооборудования [Текст] / М. М. Лукьянов, Э. А. Харисов // Электрика. – № 2, – 2001. – С. 30–32.

9. Русов В.А. Спектральная вибродиагностика [Электронный ресурс]. – Заглавие с экрана. Режим доступа : <http://vibrocenter.ru/book8.htm>

10. Барков, А. В. Интеллектуальные системы мониторинга и диагностики машин по вибрации / А. В. Барков, Н. А. Баркова // Сборник трудов семинара «Современные проблемы вибрационной диагностики и виброзащиты энергетических установок», 1999. – С. 115–156.

11. Ширман, А. Р. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования [Текст] / А. Р. Ширман, А. Б. Соловьев. – М. : Библиография, 1996. – 276 с.

12. Advanced spectral analysis / Pete Bechard. PdMA Corporation [Электронный ресурс]. – Заглавие с экрана. Режим доступа : <http://masters.donntu.edu.ua/2008/eltf/naftulin/library/letter5.htm>

13. Thomson, W. T. A Review of On-Line Condition Monitoring Techniques for Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motors - Past Present and Future [Текст] / W. T. Thomson. – Keynote address at IEEE Symposium on Diagnostics for Electrical Machines. Power Electronics and Drives. – Gijon. Spain, Sept. 1999. – Pp. 3-18.

14. Thomson, W. T. Case Histories of Rotor Winding Fault Diagnosis in Induction Motors [Текст] / W. T. Thomson, D. Rankin . – 21 1 Int. Conf Proc on Condition Monitoring, University College Swansea, March 1987.

15. Thomson, W. T. Development of a tool to detect faults in induction motors via current signature analysis [Текст] / W. T. Thomson, M. Fenger. – IEEE Industry Application Magazine, July/August 2001.

16. Модель «слабейшего звена» [Электронный ресурс]. – Заглавие с экрана. Режим доступа : <http://energybez.ru/nadegn/108-model-slabejshego-zvena.html>

17. Малафеев, С. И. Надежность технических систем. Примеры и задачи [Текст] / С. И. Малафеев, И. И. Копейкин. – М. : Лань, 2012. – 320 с.

18. Гольдберг, О. Д. Качество и надежность асинхронных двигателей [Текст] / О. Д. Гольдберг. – М. : Энергия, 1968. – 176 с.

19. Broomhead D. S., King G. P. On the qualitative analysis of experimental dynamical systems // Nonlinear Phenomena and Chaos / Ed. by S. Sarkar. Bristol : Adam Hilger, 1986. – P. 113–144.

20. Vautard R., Yiou P., Chil M. Singular-spectrum analysis: A toolkit for short, noisy chaotic signals // Physica D. 1992. – P. 95–126.

21. Бокс, Д. Анализ временных рядов, прогноз и уравнение [Текст] / Д. Бокс, Г. Дженкинс. – М. : Наука, 1970. – 295 с.

**Мартко Е. О.**, ассистент, E-mail: [martnight@mail.ru](mailto:martnight@mail.ru) Россия, Алтайский край, г. Барнаул, ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова», кафедра «Электроснабжение промышленных предприятий», +7(385-2)29-07-76.