

УДК: 621.315.62.001.18:51

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

И.А. Гутов

В статье рассмотрены математические модели старения изоляции электрооборудования для прогнозирования ее состояния, общий подход к их построению. Приведены классификация и анализ существующих моделей и методов прогнозирования надежности и технического состояния изоляции. Дано общее описание модели, ее входных и выходных параметров, сформулированы критерии для их выбора.

Ключевые слова: математическая модель, прогнозирование, изоляция, электрооборудование, классификация, динамическая стохастическая модель.

Вопросы обеспечения надежности работы электрооборудования (ЭО) - важнейшие в современном производстве. Прогнозирование состояния ЭО, как неотъемлемая часть системы обеспечения надежности работы, создает предпосылки для определения рациональных сроков проведения профилактических мероприятий и ремонтов. Такое прогнозирование целесообразно проводить на основе использования математических моделей изменения состояния наиболее "слабого" элемента данной электротехнической системы. В подавляющем большинстве случаев отказы ЭО, например асинхронных двигателей средней мощности происходят из-за повреждения изоляции обмоток статора (85-95%), причем значительную часть (30%) из них составляют износные отказы, обусловленные старением изоляции под воздействием множества факторов окружающей среды и режимов работы [1 - 5]. Поэтому прогнозирование технического состояния ЭО должно осуществляться с применением многофакторных моделей старения изоляции [1].

Таким образом, решение проблемы повышения уровня эксплуатации и обеспечения надежной работы ЭО предполагает осуществление комплекса мероприятий, одними из которых являются прогнозирование технического состояния их изоляции на базе математического моделирования.

Основными задачами в этой области являются [1]:

- анализ механизмов влияния окружающей среды и режимов работы ЭО на процессы старения его изоляции и определение комплекса существенных воздействующих факторов;
- выбор вида математических моделей процесса старения изоляции ЭО и прогнозирования ее технического состояния;
- обоснование входных и выходных параметров модели;

- экспериментальные исследования процесса старения изоляции;
- структурная и параметрическая идентификация моделей;
- разработка метода и алгоритмов прогнозирования технического состояния изоляции ЭО на основе полученных моделей ее старения;
- разработка методики прогнозирования технического состояния изоляции ЭО.

Прогнозирование технического состояния и надежности можно осуществлять на различных стадиях создания и использования ЭО: на этапе проектирования, производства и эксплуатации. На этапе эксплуатации ЭО исходными данными являются предполагаемые закономерности изменения его технических параметров. При этом целью прогнозирования технического состояния является своевременное предупреждение отказов и применение таких рабочих условий и обслуживания ЭО, которые наилучшим образом отвечают задаче обеспечения заданной надежности и эффективности.

Существующие математические модели, позволяющие прогнозировать надежность и техническое состояние изоляции ЭО, можно разделить на классы по следующим признакам [1, 6 - 11]:

- по цели моделирования: технического состояния и надежности;
- по характеру исследуемых процессов: детерминированные и стохастические;
- по динамике исследуемых процессов: статические и динамические;
- по количеству воздействующих факторов, которые учитываются в модели: однофакторные и многофакторные;
- по количеству контролируемых параметров, описывающих техническое состояние объекта исследования: одномерные и многомерные;

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

- по источнику информации, на основе которого получают сведения об изучаемых процессах: модели, синтезированные на основе результатов ускоренных лабораторных испытаний, и модели, полученные в результате обработки данных подконтрольной эксплуатации и диагностики объектов в реальных условиях эксплуатации.

Кроме того, данные математические модели можно разделить по научному подходу, при помощи которого происходит синтез модели, на три класса:

- физические или аналитические модели, полученные на основе изучения физических закономерностей, структура уравнений и параметры моделей имеют физическое толкование;

- вероятностные модели, построенные на основе статистических наблюдений с применением аппарата теории вероятностей и математической статистики;

- формальные (регрессионные, авторегрессионные, скользящего среднего, смешанные) модели, полученные на основе анализа зависимости входных и выходных параметров объекта, представленного в виде абстрактного кибернетического "черного ящика" при помощи прикладного статистического анализа.

Данная классификация моделей надежности и технического состояния изоляции ЭО приведена на рисунке 1.

Современные методы прогнозирования надежности и технического состояния ЭО можно классифицировать [1, 6 - 11]:

- по типу объекта прогнозирования: индивидуальный и групповой;

- по подходу к решению самой задачи прогнозирования: экстраполяция и статистическая классификация;

- по применяемому математическому аппарату: методы экстраполяции и интерполяции; методы, использующие аппарат регрессионного и корреляционного анализа; методы, использующие факторный анализ.

Данную классификацию можно представить в виде дерева системы методов прогнозирования (рисунок 2).

Данные классификации моделей и методов прогнозирования являются классификациями параллельно-последовательного типа [7, 14], которые наглядно представляют совокупности моделей и методов современного прогнозирования технического состояния и надежности изоляции ЭО как некоторой системы в виде иерархического дерева.

Обобщая результаты анализа моделей, подробно рассмотренных в работе [1], можно сделать следующее заключение. Разработанные модели надежности и технического состояния, имея много достоинств, описывают лишь определенные стороны процесса старения изоляции ЭО.

Аналитические модели, как правило, связывают процесс старения изоляции не более чем с двумя - тремя эксплуатационными факторами. Попытки учесть большее количество исходных параметров приводят к громоздкому виду модели, при этом снижается ее практическая ценность. Кроме того, аналитические модели не учитывают случайного характера процесса старения изоляции.

Основным недостатком вероятностных моделей является сложность получения статистических данных, учитывающих все многообразие условий эксплуатации. Такие модели используются преимущественно для расчета надежности ЭО на стадии проектирования и изготовления.

На этапе эксплуатации наиболее эффективными являются эмпирические (формальные) модели, которые описывают в явном виде зависимость изменения параметров технического состояния изоляции от воздействующих факторов окружающей среды и режимов работы. Регрессионные модели позволяют учитывать зависимость выходного параметра модели от любого количества входных параметров и всевозможных их сочетаний, но при этом не учитывают предыдущее состояние наблюдаемого параметра, т.е. строятся по единственному временному сечению. Модели авторегрессии-проинтегрированного скользящего среднего описывают процесс динамически, т.е. развернутым во времени, но совершенно игнорируют входные параметры, сводя сумму эксплуатационных воздействий к "белому шуму".

Проведя анализ всего спектра формальных моделей старения изоляции ЭО, можно сделать следующие выводы [1]:

- модели на основе простых стандартных функций широко используются в практике инженерных расчетов, которые требуют простых моделей прогнозирования технического состояния изоляции ЭО для ориентировочной оценки ее остаточного срока службы. Они описывают трендовую составляющую процесса старения изоляции. Метод прогнозирования на основе данных моделей относится к приближенным, но его отличает простота, наглядность представления процесса и сравнительная несложность вычислительных операций при практическом использовании;



Рисунок 1 - Классификация моделей надежности и технического состояния изоляции ЭО



Рисунок 2 - Дерево системы методов и моделей прогнозирования

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

- регрессионные модели используются для описания статических зависимостей, имеющих детерминированный характер. Данные модели получили широкое распространение при обработке экспериментальных лабораторных испытаниях на надежность ЭО, где четко определены воздействующие факторы;

- наиболее точными с точки зрения прогнозирования и эффективными являются многофакторные динамические стохастические модели, но для их практического использования требуется применение ЭВМ. Они учитывают в явном виде целый комплекс внешних и внутренних воздействующих факторов, состояние объекта в предшествующие периоды времени, а также включают случайные воздействия, неучтенные явно в наборе входных параметров модели, и используются при обработке экспериментальных данных подконтрольной эксплуатации и диагностики изоляции ЭО. Данные модели наиболее подходят для прогнозирования случайных динамических процессов, к которым относят старение изоляции ЭО в реальных условиях эксплуатации.

Изоляция ЭО представляет собой многокомпонентную электроизоляционную систему. В процессе эксплуатации на нее действует широкий комплекс дестабилизирующих факторов, приводящих к изменению ее состояния. Открытость системы и неоднородность ее состава обуславливает сложные связи между ее внешними и внутренними факторами. Данная система многокомпонентная не только по своим составляющим, но и по совокупности используемых материалов для ее производства. Материалы диэлектриков, используемых при изготовлении современных изоляционных конструкций, характеризуются значительной неоднородностью структуры и различием электрофизических свойств в объеме материала. Как следствие, из этого возникают трудности при исследовании процесса старения изоляции ЭО, и в частности электродвигателей.

Во время хранения и эксплуатации изоляция ЭО подвержена процессам старения. Процесс старения полимерных изоляционных материалов - это сложный физико-химический процесс, выражающийся в изменении их свойств во времени.

При исследовании процесса старения изоляции ЭО правомерно использовать системный подход, рассматривая ее как единую целостную многокомпонентную систему, а сам процесс старения - как изменение со-

стояния системы. Это позволяет избежать многих трудностей при моделировании объекта исследования - изоляции ЭО и протекающих в ней процессов старения [15].

Процесс старения относится к классу динамических процессов, в которых можно выделить детерминированную и случайную составляющие. Реализация самого процесса старения объекта в условиях эксплуатации имеет случайный характер. Изучение зависимостей данного процесса от воздействующих факторов и построение на этой основе математических моделей позволяет достаточно эффективно и точно прогнозировать техническое состояние объектов на будущее.

Для целей прогнозирования технического состояния ЭО процесс старения его изоляции целесообразно представить в виде математической модели изменения состояния системы во времени, входами которой являются воздействующие факторы окружающей среды и режимов работы, а выходами - параметры, с помощью которых можно оценить техническое состояние изоляции [15 - 17].

Общее описание математической модели старения изоляции ЭО и этапы ее построения на примере электродвигателей (ЭД) представлены на рисунке 3.

Входные параметры математической модели старения изоляции должны удовлетворять следующим требованиям: описывать условия окружающей среды; охарактеризовать суммарную дозу воздействий факторов режима работы ЭО за определенный промежуток времени эксплуатации и вычисляться на основе учета процесса изменения соответствующих параметров воздействующих факторов и их предельно допустимых значений; быть представленными в виде временных рядов; наборы входных параметров модели должны представлять комплексно процесс старения изоляции ЭО, при этом учитывать существенные воздействующие факторы, отражая преобладающее влияние того или иного механизма разрушения. Выделение из всей совокупности воздействующих факторов только существенных приводит к структурному упрощению модели и удобному ее применению в дальнейшем на практике [1].

Электроизоляционную систему ЭО можно рассматривать как предельную систему. При воздействии на такую систему внешних и внутренних факторов, не превышающих некоторого предельно допустимого значения, процесс ее старения стабилен на определенном уровне и стационарен на определенном

интервале времени, а при их превышении этот процесс ускоряется и становится нестационарным. Таким образом, изоляция ЭО при значениях параметров окружающей среды и режимов работы, не превышающих предельно допустимые, не имеет ярко выраженную тенденцию старения (деградации) на определенном интервале времени. Однако если данные параметры превышают некоторые критические значения, то процесс старения будет протекать интенсивнее, и система ста-

новится нестабильной с ярко выраженным процессом деградации.

Поэтому состояние данной системы можно описать интегральными характеристиками, которые вычисляются на основе учета процесса изменения соответствующих параметров воздействующих факторов, их предельно допустимых значений и показывают некоторую суммарную дозу воздействия фактора за определенный промежуток времени эксплуатации в виде [1, 18, 19]:

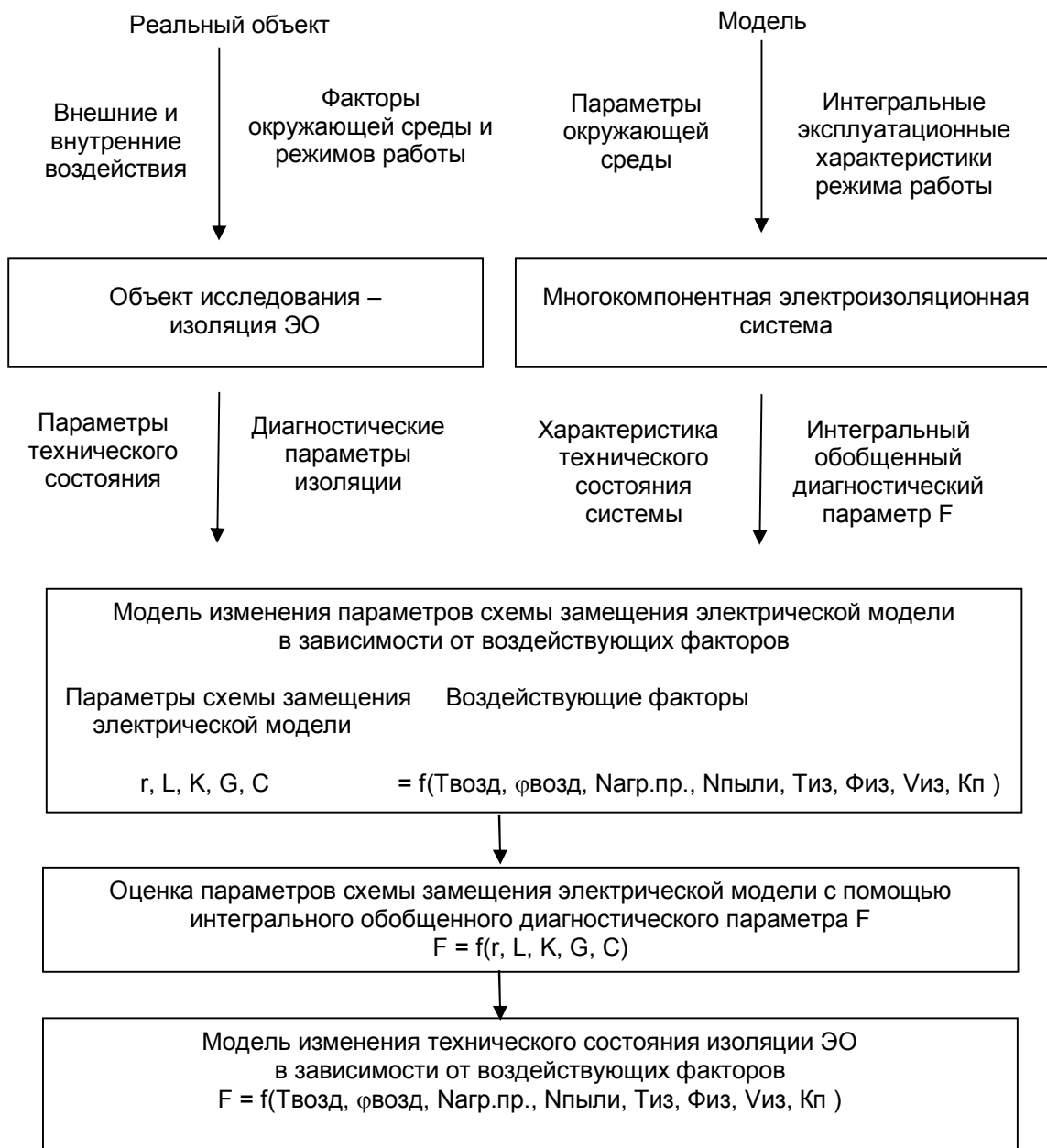


Рисунок 3 - Общее описание математической модели старения изоляции ЭО и этапы ее построения

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

$$H = \begin{cases} 0, \text{ при } h \leq h_{\text{доп}} \\ \sum_{i=1}^T \int_0^t (h(t) - h_{\text{доп}}) dt \end{cases} \quad (1)$$

где H - интегральная эксплуатационная характеристика;

h - параметр эксплуатации;

$h_{\text{доп}}$ - предельно допустимое значение параметра эксплуатации по техническим условиям (ТУ) для конкретного типа ЭО;

t - время воздействия фактора;

T - время эксплуатации ЭО.

В результате анализа условий эксплуатации ЭО на производстве и их влияния на процессы старения изоляции принято выделять две группы существенных воздействующих факторов, влияющих на техническое состояние изоляции. Первую группу воздействующих факторов составляют условия окружающей среды, а вторую группу - режимы работы.

Исходя из вышеперечисленных свойств электроизоляционной системы ЭО и требований к описанию динамических процессов, условия окружающей среды описываются параметрами микроклимата: температурой окружающей среды $T_{\text{возд}}$, °С; относительной влажностью окружающего воздуха $\varphi_{\text{возд}}$, %; концентрацией агрессивных примесей $N_{\text{агр.пр.}}$, мг/м³ и пыли $N_{\text{пыли}}$, мг/м³. Данные параметры окружающей среды являются непрерывно сезонно и суточно изменяющимися величинами. В математической модели старения изоляции ЭО они представлены в виде временных рядов среднемесячных значений.

В математической модели старения изоляции ЭО должны учитываться следующие основные параметры режима работы: температура изоляции $t_{\text{из}}$, °С и вибрационная скорость $v_{\text{из}}$, мм/с в рабочем установившемся режиме, частота пусков кп, 1/час, время работы $t_{\text{р}}$, час/сутки и простоя $t_{\text{пр}}$, час/сутки, время эксплуатации ЭО T , сутки. Указанные параметры описывают особенности режимов работы и использования ЭО в различных технологических процессах.

Для количественной оценки воздействия факторов режима работы ЭО на его изоляцию, а также учета времени этого воздействия, используются следующие интегральные эксплуатационные характеристики (ИЭХ): тепловая ИЭХ $T_{\text{из}}$, влажностная ИЭХ $\varphi_{\text{из}}$, вибрационная ИЭХ $V_{\text{из}}$, коммутационная ИЭХ $K_{\text{п}}$, определяемые по формуле (1).

Выбор выходного параметра математической модели старения изоляции ЭО или их группы является задачей сложной

и требующей четкого представления об объекте исследования и целях их использования. На их основе требуется объективно оценить состояние изоляции ЭО и сделать прогноз его изменения на определенный промежуток времени вперед, при этом необходимо учитывать аспекты практического использования модели и получения исходной информации при диагностировании объектов.

Исходя из требований диагностирования и прогнозирования технического состояния изоляции ЭО, можно сформировать следующую систему критериев по выбору выходных параметров модели [1]:

- они должны определяться на основе метода диагностирования, который относится к методам неразрушающего контроля. При этом необходимо учитывать, что данный метод диагностирования может использоваться как основной;

- с их помощью можно оценивать состояние изоляции ЭО - наиболее "слабого" элемента данной электротехнической системы;

- они должны адекватно описывать состояние изоляции ЭО;

- параметры технического состояния изоляции ЭО можно достаточно просто измеряться техническими средствами непосредственно на месте эксплуатации;

- необходимо учитывать тот факт, что при разработке математической модели старения изоляции с увеличением числа выходных параметров модели старения изоляции ЭО соответственно увеличивается количество "шумовых" компонент модели, и, следовательно, вдвойне возрастает число оцениваемых коэффициентов, что в свою очередь, приводит к увеличению остаточной дисперсии модели. Все это ведет к громоздкости и неудобному практическому использованию разрабатываемой математической модели;

- предпочтительно иметь один обобщенный параметр технического состояния изоляции ЭО, а не группу параметров. Использование группы параметров технического состояния изоляции ЭО позволяет более объективно охарактеризовать состояние изоляции, но усложняет процедуру получения исходной информации, при этом требуется комплекс аппаратных средств и увеличивается объем измерений. Это затрудняет практическое использование предлагаемых математических моделей.

Например, использование метода диагностирования изоляции обмоток ЭД на основе параметров переходного процесса, возни-

кающего при тестировании обмотки импульсом напряжения, является эффективным методом неразрушающих испытаний [1, 20, 21]. Исследования показывают, что по изменению данных параметров технического состояния изоляции ЭД можно достаточно точно судить о процессе старения изоляции обмоток статора ЭД. Кроме того, данные параметры можно интерпретировать как отклик (реакцию) системы на тестовое возмущение, по которому оценивают ее состояние в целом. Данный диагностический показатель изоляции обмоток ЭД является интегральным параметром, характеризующим все составляющие элементы ее электрической модели (рис. 3). Динамика старения изоляции под воздействием окружающей среды и режимов работы ЭД на основе диагностических параметров, определяемых этим методом, достаточно изучена и дано ее математическое описание для целей прогнозирования [1, 18 – 20].

Для адекватного описания процесса старения изоляции ЭО должна быть создана модель, которая описывает этот процесс динамически, определяет зависимость изменения состояния объекта от воздействия на него целого комплекса факторов, при этом учитывает случайные воздействия. Всем этим условиям удовлетворяют динамические стохастические модели [17].

Идентификация модели состоит в отыскании по входным и выходным параметрам некоторой системы эквивалентной исходной из некоторого заданного класса. Она предполагает, во-первых, использование априорной информации при определении структуры модели и, во-вторых, обработку данных измерений для получения необходимой апостериорной информации об исследуемой системе.

Процесс старения изоляции ЭО можно описать стохастической моделью на основе разностного уравнения. Данная модель наряду с моделью состояний Безу и полиномиальной дробью наиболее тесно связывает текущие данные "вход-выход" с минимальной моделью. Поэтому именно она преимущественно используется для идентификации и прогнозирования по данным "вход-выход". Идентификация, основанная на этой модели, имеет важное достоинство: вычисленные значения параметров непрерывно зависят от данных [16]. Входные и выходные параметры модели должны быть представлены в виде временных рядов.

Для идентификации исследуемой системы должны использоваться стохастические методы. Среди всех алгоритмов идентифика-

ции наибольшее значение для технических приложений имеют алгоритмы, приспособленные для работы в замкнутом контуре и основанные на последовательном уточнении оценок параметров, которые при функционировании в случайной среде получают по искаженным помехами наблюдениям. В данном случае в качестве общей модели системы используется дискретная по времени модель. Оценку параметров стохастической модели можно произвести одним из рекуррентных методов идентификации: методом наименьших квадратов, методом максимального правдоподобия, методом, основанным на вычислении ошибки предсказания или их модификацией.

Построение модели старения изоляции для целей прогнозирования ее технического состояния сводится к следующим этапам:

- выбор входных и выходных параметров модели старения электроизоляционной системы ЭО;
- разработка методики экспериментальных исследований;
- сбор и предварительная обработка экспериментальных данных лабораторных и производственных испытаний;
- концептуальный выбор математической модели;
- структурная идентификация - определение порядка выбранной модели;
- оценивание параметров при известном порядке модели;
- проверка адекватности построенной модели для целей прогнозирования.

Итак, для целей прогнозирования технического состояния ЭО процесс старения его изоляции целесообразно представить в виде математической модели изменения состояния системы во времени, вход которой описывается характеристиками воздействующих факторов окружающей среды и режимов работы, а выход - параметрами технического состояния изоляции ЭО. При этом входные параметры модели можно представить в виде параметров окружающей среды и эксплуатационных интегральных характеристик режима работы ЭО, которые вычисляются на основе учета процесса изменения соответствующих параметров воздействующих факторов и их предельно допустимых значений и характеризуют суммарную дозу воздействия факторов за время эксплуатации, а выходной параметр модели - интегрального обобщенного диагностического параметра, с помощью которого можно описать техническое состояние изоляции ЭО.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гутов, И.А. Прогнозирование состояния электродвигателей на основе использования многофакторных моделей старения изоляции: Дис... канд. техн. наук. – Барнаул, 1997. -265 с.
2. Котеленец Н.Ф., Кузнецов Н.Л. Испытания и надежность электрических машин: Учеб. пособие для вузов по спец. "Электромеханика". - М.: Высш. шк., 1988. -232 с.
3. Гольдберг О.Д., Гурин Я.С., Свириденко И.С. Проектирование электрических машин: Учебник для вузов /Под ред. О.Д. Гольдберга. - М.: Высш. шк., 1984. - 431 с.
4. Воронин, С.М. Влияние текущего ремонта и наладки электропривода на надежность работы средств электромеханизации животноводства: Сборник научных трудов / ВНИПТИМЭСХ. - Черноград, 1984. - 182 с.
5. Сырых Н.Н., Чекрыгин В.С., Калмыков С.А. Техническое обслуживание электрооборудования в сельском хозяйстве. - М.: Россельхозиздат, 1980. -223 с.
6. Гаскаров Д.В., Голинкевич Т.А., Мозгалевский А.В. Прогнозирование технического состояния и надежности радиоэлектронной аппаратуры /Под ред. Т.А. Голинкевича. - М.: Сов. радио, 1974. -224 с.
7. Теория прогнозирования и принятия решений /С.А. Саркисян, В.И. Каспин, В.А. Лисичкин и др.; Под ред. С.А. Саркисяна. - М.: Высш. школа, 1977. - 351 с.
8. Справочник по электрическим машинам: В 2 т. Т.1 /Под общ. ред. И.П. Копылова, Б.К. Клокова. - М.: Энергоатомиздат, 1988. - 456 с.
9. Надежность и эффективность в технике: Справочник. В 10 т. Т.9. Техническая диагностика / Под общ. ред. В.В. Клюева, П.П. Пархоменко. - М.: Машиностроение, 1987. - 352 с.
10. Горский, Л.К. Статистические алгоритмы исследования надежности. - М.: Наука, 1970. - 219 с.
11. Барлоу Р., Крошан Ф. Статистическая теория надежности и испытания на безотказность. - М.: Наука, 1984. – 234 с.
12. Пархоменко П.П., Согомоян Е. С. Основы технической диагностики. - М.: Энергоиздат, 1981. -320 с.
13. Райншке, К. Модели надежности и чувствительности систем. - М.: Мир, 1979. - 452 с.
14. Старик Д.Э., Каспин В.И. Прогнозирование и эффективность научно-технического прогресса. - М.: МАИ, 1975. -60 с.
15. Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П. Введение в системный анализ: Учеб. пособие для вузов. - М.: Высш. шк., 1989. - 367 с.
16. Современные методы идентификации систем /П. Эйкхофф, А. Ванечек, Е. Савараги и др.: Пер. с англ. Под ред. П. Эйкхоффа. - М.: Мир, 1983. -400 с.
17. Кашьяп Р.Л., Рао А.Р. Построение динамических стохастических моделей по экспериментальным данным. - М.: Наука, 1983. -384 с.
18. Хомутов, О.И. Система технических средств и мероприятий по повышению надежности электрооборудования: Учеб. пособие /Алт. политехн. ин-т им. И.И.Ползунова. - Барнаул: Б.и., 1989. - 95 с.
19. Хомутов, О.И. Система технических средств и мероприятий повышения эксплуатационной надежности изоляции электродвигателей, используемых в сельскохозяйственном производстве: Дис... докт. техн. наук. - Челябинск, 1992. - 450 с.
20. Гутов, И.А. Моделирование технического состояния изоляции электрических машин // Сборник научных трудов кафедры "Электроснабжение промышленных предприятий" /Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. -Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2002. – С.21 - 32
21. Гутов, И.А. Определение значений диагностических параметров изоляции по конструкции электрических машин // Вестник Алтайского государственного технического университета им. И. И. Ползунова. Приложение к журналу "Ползуновский альманах": Электроснабжение и электротехнологии в сельском хозяйстве. -2003. -№1. – С. 19- 20

Гутов И.А., к.т.н., доц., тел. (3852) 36-78-66