

УДК 519.254:621.3

Системный подход к анализу деградационных процессов в электротехнических устройствах

Лисов А.А.*, Чернова Т.А., Горбунов М.С.*****

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия

**e-mail: 3141220@mail.ru*

***e-mail: chernova3244@gmail.com*

****e-mail: alfred.hammersmit@yandex.ru*

Аннотация

Рассмотрен системный подход к повышению надёжности и эффективности эксплуатации электротехнических устройств, предупреждению деградационных отказов в электроприводе в авиации, в спутниковой связи и др. областях, за счёт формирования причинно-следственной схемы отказа, разработки математической модели оценки деградационного состояния устройств, диагностики и прогноза их остаточного ресурса по результатам моделирования.

Ключевые слова: системный подход к повышению безотказности электротехнических устройств, причинно-следственная схема отказа, математическая модель оценки деградационного состояния, эксплуатационная надёжность устройств, прогноз остаточного ресурса.

Развитие и совершенствование техники, широкое внедрение новых технологий в авиации, активное применение космических технологий в повседневной практике использования «на земле», связано с повышением рисков наступления техногенных чрезвычайных ситуаций. В этих условиях на первый план выходит проблема обеспечения безопасности ответственного оборудования, разработка методов и практических средств прогноза безопасности функционирования рассматриваемых устройств и оценки их остаточного ресурса, предупреждение деградационных отказов электрооборудования в авиации, в навигации, в спутниковой связи и др. сферах практической деятельности.

Объектом разработки является информационно-компьютерная система анализа, моделирования и оценки деградационного состояния электротехнических устройств. **Целевое назначение системы** - формирование математической модели оценки деградационного состояния электротехнических устройств; прогноз остаточного ресурса. **Исследование проводится с позиций системного анализа** и системного подхода к анализу деградационных процессов [1, 6]. **Целью исследования** является повышение надёжности и эффективности эксплуатации электротехнических устройств, обеспечение безотказности; предупреждение отказов и, как следствие, снижение аварийности, исключение катастрофических ситуаций, особо опасных в авиации [13, 17, 18]. При реализации цели учтены тенденции оптимизации сроков эксплуатации устройств, увеличения сроков эксплуатации без снижения эксплуатационной безопасности [12].

Разрабатываемая информационно-компьютерная система предупреждения отказов предполагает учет всех факторов внешней среды, оказывающих влияния на

объект через изменение его характеристических показателей. Для асинхронного двигателя (АД), используемого в авиации, основными факторами внешней среды могут быть следующие.

1. Резкие перепады температуры, изменяющие сопротивления обмоток и обеспечивающие изменения уровней токов, и, как следствие, приводящие к порче изоляции.
2. Резкие перепады давления, изменяющие давление внутри АД, в воздушном зазоре, изменяющие моменты трения (особенно для АД с воздушным охлаждением).
3. Наличие во внешней среде влажности, химически активных элементов приводит к разрушению изоляции, элементов подшипников, и, соответственно к изменению характеристических параметров.
4. Внешними к АД и к системе обеспечения его безотказности являются показатели качества сети электропитания. Изменение уровня напряжения питания, его перекос по фазам, изменение частоты, даже в допустимых пределах, приводит к изменению электромагнитного состояния магнитопроводов, токопроводов, вращающих и тормозных моментов, к вибрациям и в результате к изменению характеристических показателей.

Ближайшим прототипом по отношению к разрабатываемой системе предупреждения отказов в технических устройствах являются сформированные и рекомендованные подходы, основанные на методах обеспечения безотказности сложных технических систем [2]. Ближайшим прототипом по анализу и повышению надёжности электрических машин являются разработки школы Гольдберга О.Д. по надёжности электрических машин [3].

В настоящей работе предложены в качестве характеристических параметров деградационные отклонения напряжений в фазах статора и функции механических колебаний ротора в режиме выбега при отключении напряжения питания [5, 7]. Относительно объекта исследования установлено информационное содержание характеристик АД в режиме выбега при отключении цепи питания. Установлены критерии останова АД, снятия его с эксплуатации.

Разрабатываемый комплекс включает математическое и программное обеспечение моделирования, анализа и прогноза надежности сложных технических объектов. Система состоит из восьми подсистем [8, 11, 16]. Структурная схема и назначение его подсистем показаны на рис. 1.

Основное назначение подсистем и решаемые ими задачи показаны на схеме рис 1. Каждая подсистема имеет сложную структуру. В настоящей работе объектом исследования является электромеханический преобразователь – асинхронный электродвигатель (АД) средней мощности. Его общий вид, разрез, и основные параметры приведены на рис. 2. Источником информации о состоянии АД выбран и обоснован режим его выбега. Статистический анализ распределения отказов по характеру повреждения элементов АД приведен в таблице 1.

Таблица 1.

Статистический анализ распределения отказов по характеру повреждений элементов АД

<u>N</u> <u>п/п</u>	Характер повреждения обмотки	Доля %
1	Межвитковые замыкания	93
2	Повреждение и пробой пазовой изоляции	2
3	Пробой межфазной изоляции	5

Когнитивно-целевая структурная схема надежности (отказов) (1) приведена на

рис. 3.

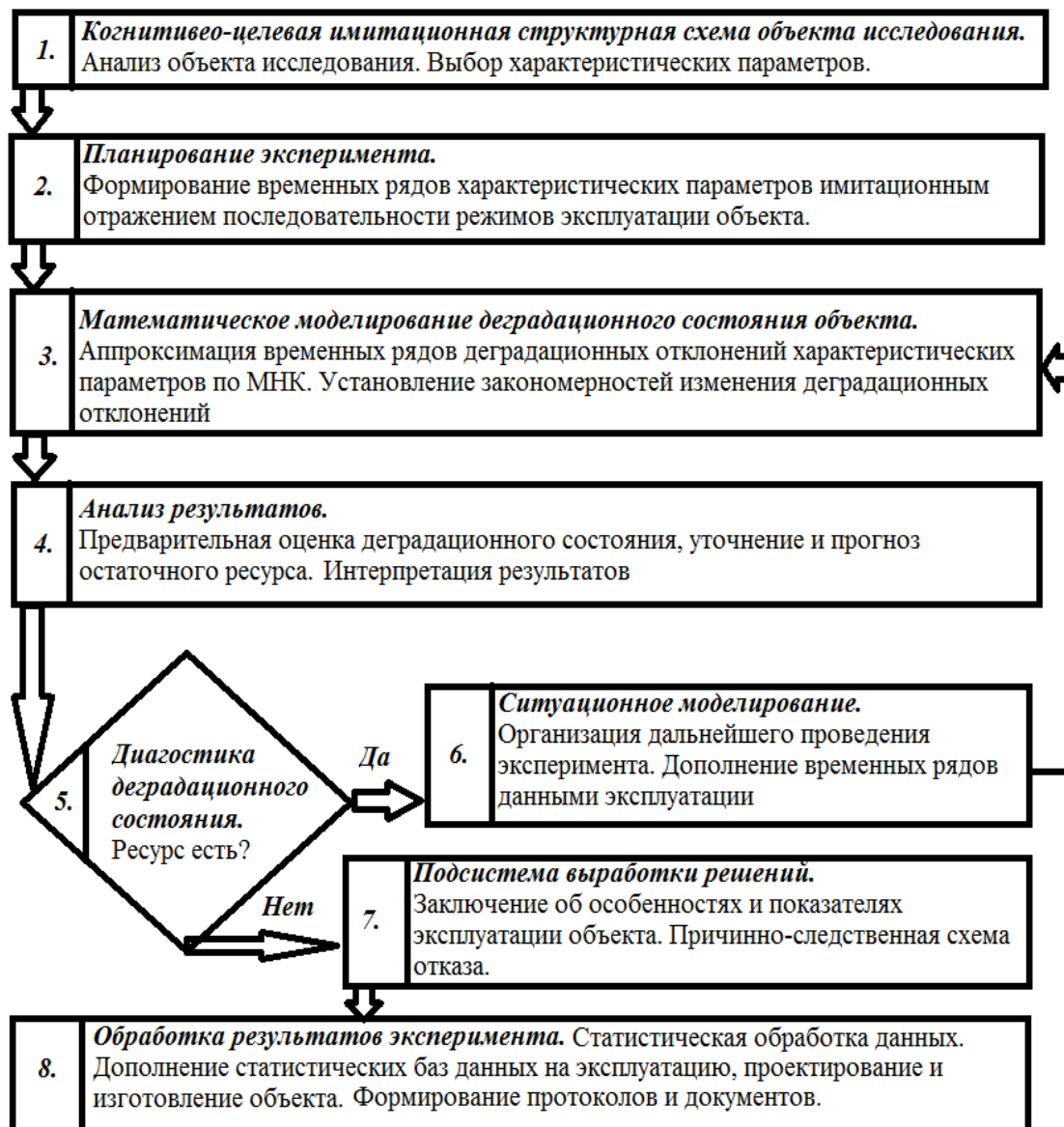
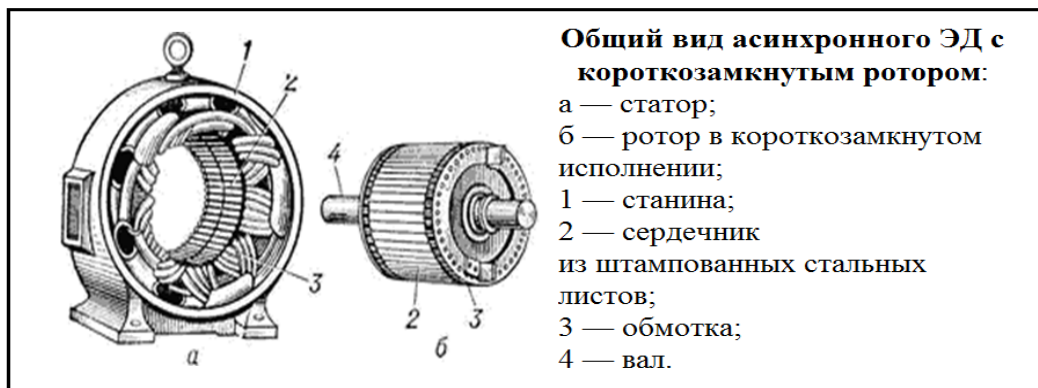
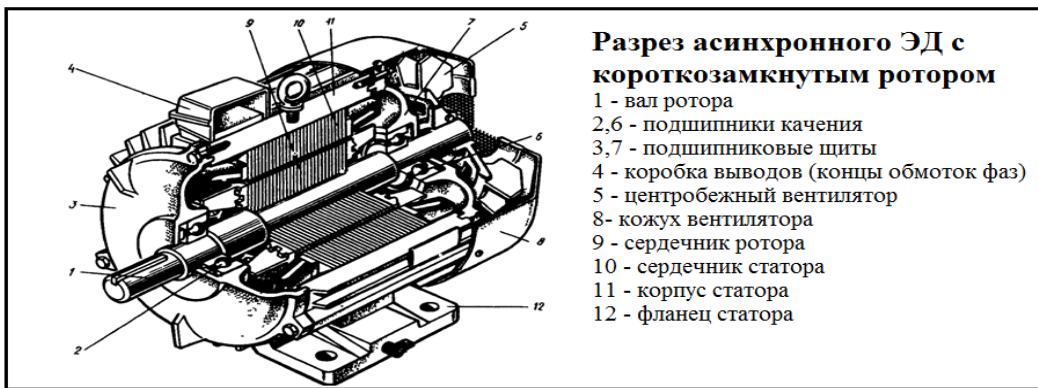


Рис. 1. Функциональная схема комплекса анализа, моделирования и прогноза деградационного состояния электротехнических устройств



Общий вид асинхронного ЭД с короткозамкнутым ротором:

- а — статор;
- б — ротор в короткозамкнутом исполнении;
- 1 — станина;
- 2 — сердечник из штампованных стальных листов;
- 3 — обмотка;
- 4 — вал.



Разрез асинхронного ЭД с короткозамкнутым ротором

- 1 - вал ротора
- 2,6 - подшипники качения
- 3,7 - подшипниковые щиты
- 4 - коробка выводов (концы обмоток фаз)
- 5 - центробежный вентилятор
- 8 - кожух вентилятора
- 9 - сердечник ротора
- 10 - сердечник статора
- 11 - корпус статора
- 12 - фланец статора

Анализ механического вращения ротора в режиме выбега

Полезная мощность	$P_n = 13$ кВт
Число фаз.....	$m = 3$;
Соединение фаз.....	Δ/Y
Напряжение питания	$U = 220/380$ В;
Частота питания.....	$f = 50$ Гц;
Скорость вращения ротора.....	$n = 1500$ об/мин;
Исполнение.....	нормальное.

Основные геометрические размеры:

Наружный диаметр статора.....	$D_s = 20$ см;
Длина статора.....	$l_s = 20$ см;
Воздушный зазор.....	$\delta = 0.45$ мм;
Внешний диаметр ротора.....	$D_r = 18$ см;
Высота ярма ротора.....	$h_r = 3$ см;
Диаметр вала	$d_b = 6$ см;
Высота зубцовой зоны ротора.....	$h_z = 3$ см;
Длина ротора.....	$l_r = 12.8$ см;

Обмотка, пазы статора:

Число пазов статора.....	$z_s = 36$
Тип обмотки.....	петлевая двухслойная
Число витков фазы обмотки статора.....	$n_s = 120$
Шаг обмотки по пазам.....	$y = 7$
Число параллельных ветвей фазы.....	$a = 1$

Обмотка, пазы ротора:

Число пазов ротора.....	$z_r = 46$
Вес стержней короткозамкнутой обмотки ротора	$G_c = 1.58$ кг.

Рис. 2. Объект исследования - электромеханический преобразователь, АД средней мощности. Его общий вид, разрез, и основные параметры.

Широкое использование методов МНК для аппроксимации разных функциональных зависимостей встречающихся в электротехнических устройствах (включая лавинные процессы с крутыми фронтами, процессы гистерезисного перемагничивания магнитных материалов и др.) позволят достаточно просто определить экстремальные характеристики [5, 15] .

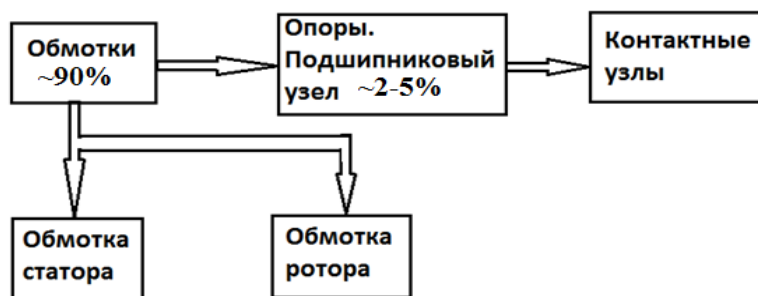


Рис.3. Когнитивно-целевая структурная схема надёжности (подсистема 1)

Возможно применение алгоритмов *оптимального планирования экспериментов* для объектов исследования. Подсистема планирования эксперимента (2) предназначена для формирования и реализации алгоритма полного факторного анализа. В исследуемом объекте установлены два основных фактора отказов: межвитковые замыкания статорной обмотки и изнашивание и повреждение подшипникового узла. Подсистема строится на полном факторном эксперименте для 2х факторного анализа.

Для разрабатываемой системы важнейшим показателем её эффективности является предупреждение отказа, индикация отказа. Как указано на схеме рис. 3 для АД более 90% отказов обусловлены межвитковыми замыканиями в обмотках статора и только около 5% отказов связано с повреждением в опорах, в исследуемом АД – в подшипниках. В системе, обеспечивающей безотказность эксплуатации,

недопустимы никакие, ни частые, ни достаточно редкие виды отказов. Поэтому в системе предусмотрено тщательное наблюдение за состоянием и обмоток, и подшипников и анализ результатов. Критерием межвитковых замыканий в обмотках в режиме выбега является коэффициент искажения фазных напряжений в обмотках статора. Критерием повреждения подшипникового узла в режиме выбега АД является постоянная времени функции затухания частоты вращения ротора. При выходе значений какого-либо критерия за допустимые пределы выдаётся сообщение и АД снимается с эксплуатации.

Структурная схема подсистемы (3) математического моделирования деградационных процессов в техническом объекте, изнашивания его элементов и всего технического объекта в целом представлена на рис. 4 [10, 11, 14]. В настоящей работе решается задача синтеза информационно-компьютерной системы предупреждения отказов при эксплуатации технических объектов. Ядром разрабатываемой системы является подсистема (3) математического моделирования деградационных процессов в исследуемом техническом объекте, оценки степени изнашивания его элементов и всего объекта в целом.

Практически все остальные подсистемы, входящие в разрабатываемую систему, тоже предполагают решение определённых математических задач.

Виды математических моделей, используемых при разработке информационно-компьютерной системы предупреждения отказов, их сочетание и взаимодействие представлены на рис. 4.

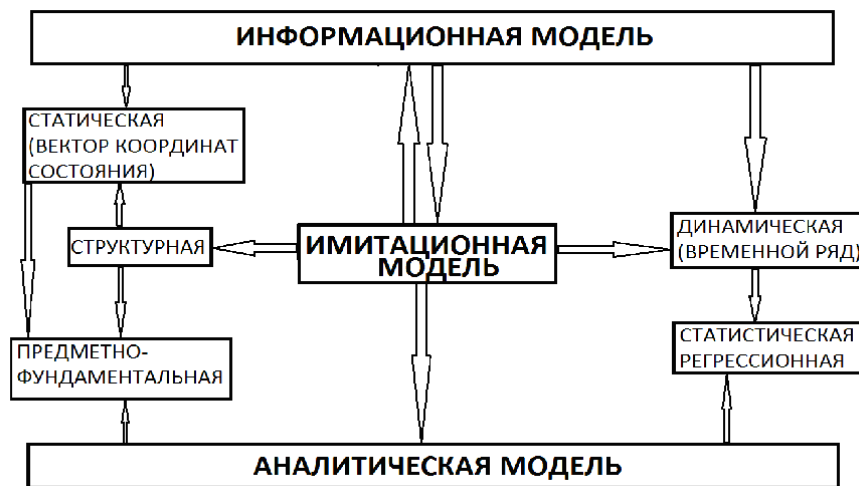


Рис. 4. Структурная схема подсистемы математического моделирования деградационных процессов в электротехническом объекте (подсистема 3)

Имитационная модель предполагает имитационное отражение структуры объекта (пространственную модель) и динамику изменения его процессов и показателей во времени (временные ряды).

Информационная модель – математическое описание объекта вектором координат его состояния, множеством значений изменяющихся характеристик в табличной форме, в форме графической информационной модели и др. Формированию информационной модели предшествует системный анализ, позволяющий выделить существенные части, свойства, связи моделируемой системы, определить её структуру.

Аналитическая модель предполагает описание протекающих в нем процессов, поведение его элементов, их взаимодействие и поведение всего объекта в целом строгими математическими соотношениями, имеющими силу закона. Основу указанных соотношений составляют понятия классической математики: величина, формула, функция, уравнение, система уравнений, дифференциал, интеграл и т.д.

Результаты информационной модели в форме вектора координат состояния системы служат основой для построения предметно-фундаментальной модели исследуемого объекта, построенной с использованием аналитических, физико-математических законов его функционирования, его принципов действия.

Временные ряды, аппроксимируемые статистическими регрессионными методами наименьших квадратов (МНК) позволяют установить *эмпирические* закономерности изменения деградационного состояния объекта, выполнить прогноз, оценить остаточный ресурс, предупредить отказ [9, 19, 20].

Так как разрабатываемая система ориентирована на сложные технические объекты, то в подсистему (3) предполагается включить разработку и применение технологий Data Mining [4]. Цель технологии Data Mining – синтез на основе данных таких моделей, которые не могут быть найдены обычными методами. В настоящей работе предполагается включение предсказательной модели (predictive) Data Mining – модели последовательностей, описывающих функции, позволяющих выполнять прогноз изменения характеристических параметров на основании данных их изменения за прошедший период наблюдения. При этом результаты анализа АД предполагается использовать в качестве отладочного варианта.

Подсистема (4) Анализа результатов расчетов предназначена для установления текущих оценок деградационного состояния объекта, для определения степени достоверности и точности оценок, для прогноза последующей эксплуатации. Блок-схема методов аналитического прогнозирования, их последовательности и согласованности представлена на рис. 5.



Рис.5. Блок-схема методов аналитического прогнозирования (подсистема 4)

Подсистема (5) Диагностики деградационного состояния объекта предназначена для обобщения и интерпретации статистических показателей, для определения работоспособности объекта и степени его износа. Её структурная схема представлена на рис. 6. Из рис. 6 видна совокупность методов диагностики деградационного состояния объекта.

Если при диагностике объекта установлены его работоспособность и исправность, то в зависимости от степени его износа подсистема (6) Ситуационного управления и моделирования предназначена для формирования сигнала на дальнейшую эксплуатацию объекта и формирование алгоритма его последующего наблюдения.



Рис. 6. Структурная схема диагностики и интерпретации показателей деградационного состояния объекта (подсистема 5)

Алгоритм последующей эксплуатации объекта и дискретность контрольных операций зависят от степени износа объекта в состоянии его работоспособности.

Ситуационная модель управления предполагает два режима: либо решение по дальнейшей эксплуатации принимает эксперт, хорошо знающий исследуемый объект и предметную область, либо на основе информационно-компьютерного анализа множества конкретных ситуаций, тогда используется система автоматизированного принятия решений. Очевидно, что второй случай более длителен, не гарантирует полноту описания всех возможных ситуаций, требует формирования статистической базы показателей ситуаций, что далеко не всегда возможно. Динамическое пополнение базы показателей ситуаций обеспечивает возможность усовершенствования функций принятия решений в изменяющихся условиях работы объекта, усовершенствования формируемых информационно-математических моделей. В объектах с жесткими требованиями по безотказности

целесообразен комплексный подход – сочетание информационно-компьютерной индикации и принятия решения экспертом.

Подсистема (7) Выработки решений предназначена для анализа причин прекращения эксплуатации объекта, для установления фактов нормального завершения нормативного срока эксплуатации, предусмотренного в ТУ на объект; или для установления и анализа причинно-следственной схемы аварийного отказа.

Подсистема (8) Обработки результатов экспериментов предназначена для статистической обработки результатов всего эксперимента, интерпретации их для формирования протоколов и иных документов, для дополнения показателей эксперимента с занесением в специализированные объектно-ориентированные базы данных.

Сценарий функционирования информационно-компьютерной системы предупреждения отказов при эксплуатации технических объектов обеспечения их безотказности предполагает следующий алгоритм, разработанный, реализованный и апробированный на примере асинхронного электродвигателя (АД) средней мощности с короткозамкнутым ротором [5, 7] (см. рисунок 2).

1. При поступлении АД на место эксплуатации проведение его контрольного испытания. В случае нового образца – подтверждение его паспортных данных, в случае не нового, но пригодного к эксплуатации образца – определение его рабочих показателей (предусмотренных по ТУ), принимаемых в качестве начальных.

2. В зависимости от жесткости требований по надежности и от деградационного состояния АД – планирование режимов эксплуатации и дискретности контрольных испытаний.

3. Все результаты контрольных испытаний регистрируются в специальных базах данных, формируются временные ряды, аппроксимируемые по МНК, устанавливаются закономерности деградации объекта [15, 16]. Особенности разрабатываемой модели состоят в следующем: в [5, 7] разработан имитационно-рекуррентный подход к анализу деградационного изменения отклонений характеристических параметров. Под отклонением понимают разность между текущим и номинальным значениями (или между текущим и начальным значениями). Формирование систем уравнений относительно отклонений параметров существенно упростило алгоритмы, позволило линеаризовать системы.

4. В результате каждого контрольного испытания АД уточняется его остаточный ресурс.

5. Информация о деградационном состоянии АД, о его остаточном ресурсе поступает пользователю.

6. Если объект еще подлежит эксплуатации, то в результате методов ситуационного моделирования и управления корректируются условия эксплуатации, дискретность контрольных испытаний, АД отправляется на дальнейшую эксплуатацию, а система обеспечения безотказности циклически возвращается в пункт 3.

7. Если ресурс выработан, АД снимается с эксплуатации. Здесь под завершением ресурса понимают достижение характеристическими параметрами

предельно-допустимых значений. Таким образом, возникновение аварийных сбоев в режимах эксплуатации АД практически исключается. В результате анализа закономерностей деградиационного изменения элементов АД и его характеристических параметров устанавливается причинно-следственная схема отказа.

8. Обработка результатов эксплуатации АД [9, 10] предполагает итоговую статистическую обработку показателей за весь цикл наблюдения, расчеты средних, дисперсий, рассеяния-разбросов, корреляционный и регрессионный анализы, оценку достоверности установленных характеристик, дополнения баз статистических данных на объект для выработки рекомендаций, для улучшения качества объекта при его проектировании и изготовлении, для обеспечения наиболее эффективных показателей эксплуатации. При этом формируются и подготавливаются протоколы и иные документы о выводах по эксплуатации объекта.

Таким образом, обеспечивается безотказность эксплуатации АД.

В заключение отметим, что для регистрации сигналов используются простые недорогие измерительные приборы: вольтметры и тахометры. Система регистрации и обработки отклонений характеристических параметров может использовать как непрерывные функции сигналов, так и дискретные. Система обеспечения безотказности режимов эксплуатации рассматриваемого АД предполагает дискретные данные с формированием временных рядов или дискретные данные, зависящие от количества циклов запуск-останов АД.

Заметим также, что на момент подготовки статьи основное ядро программного обеспечения разработано и реализовано авторами на ЭВМ. Информационно-

компьютерная система обеспечения безотказности режимов работы технических объектов разрабатывается на языке программирования C++. Сбор и хранение статистических данных реализуется в СУБД Oracle.

Выводы

В результате системного подхода к анализу деградационных процессов электротехнических устройств появляется возможность:

1. сформировать имитационный рекуррентный подход к исследованию и моделированию деградационных процессов электротехнических устройств;

2. разработать математические модели нелинейных деградационных процессов и характеристик электротехнических устройств;

3. выполнять оценку режимов безотказной работы электротехнических устройств и их остаточного ресурса по изменению деградационного отклонения характеристического параметра. Использование такой оценки существенно упрощает моделирование и снижает на порядок системы уравнений;

4. формировать исчерпывающую информацию о функциональном состоянии асинхронного электродвигателя, о степени деградационного износа и о продолжительности остаточного ресурса при отключении от сети питания, в процессе выбега.

Формирование информационно-компьютерной системы анализа, моделирования и оценки причин и последствий деградационного состояния электротехнических устройств предусматривает:

1. разработку комплекса программ оценки деграционных процессов электротехнических устройств в режимах их функционирования при эксплуатации. Этот комплекс программ позволит исследовать деграционный износ электротехнических устройств единой серии в различных и аналогичных условиях эксплуатации на единой основе, выполнять сравнительный анализ деградации объектов;

2. разработку практического средства прогноза режимов функционирования электротехнических устройств и оценки остаточного ресурса; реализацию на ЭВМ оценки фактического состояния и остаточного ресурса АД по его характеристикам в режиме выбега: по функциям изменения напряжений в фазах статора и по закономерностям механического вращения ротора.

Экономическая эффективность разрабатываемой информационно-компьютерной системы для каждого изделия определяется следующими позициями:

1. прогноз и упреждение неожиданных аварий (что особенно важно в авиации);

2. снижение требований к выделению специального дополнительного времени на проведение контрольных испытаний и к вмешательству в конструкцию устройств;

3. оптимизация сроков эксплуатации устройств; увеличение сроков эксплуатации без снижения эксплуатационной безопасности.

Важнейшим показателем эффективности разрабатываемой системы является обеспечение безотказности, исключение аварий и катастроф. При этом, «индивидуальное слежение» за эксплуатацией каждого «индивидуального» объекта

из промышленной партии, работающего в конкретных условиях, со своей «индивидуальной» историей режимов обеспечивает наиболее эффективные показатели эксплуатации: оптимальные ресурс, интервалы и сроки контрольных испытаний. Исключается снятие с эксплуатации ещё годных изделий. Таким образом обеспечивается оптимизация экономических затрат на эксплуатацию АД.

Библиографический список

1. Волкова В.Н., Денисов А.А. Теория систем. - М.: Высшая школа, 2006, - 511 с.
2. Александровская Л.Н., Афанасьев А.П., Лисов А.А. Современные методы обеспечения безотказности сложных технических систем. - М.: Логос, 2001. - 208 с.
3. Гольдберг О.Д. Надёжность электрических машин - М.: Издательский центр «Академия», 2010. - 288 с.
4. Дюк В.А., Самойленко А.П. Data Mining. - СПб.: Питер, 2001. - 368 с.
5. Лисов А.А., Чернова Т.А., Горбунов М.С. Имитационный подход к исследованию и моделированию деградационных процессов электротехнических преобразователей // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т.24. № 2. С. 149 - 156.
6. Рябинин И.А. Надёжность и безопасность структурно сложных систем. - СПб.: Политехника, 2000. - 248 с.
7. Лисов А.А., Чернова Т.А., Горбунов М.С. Моделирование предельных состояний в эксплуатации электромеханических преобразователей // Труды МАИ. 2017. № 95. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=84624>

8. Костиков Ю.А., Чернова Т.А. О методологии научного исследования эффективности оценки деградиационного изменения технических устройств // Инновации и инвестиции. 2018. № 6. С. 237 - 243.
 9. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы: – М.: Наука, 1989. - 432 с.
 10. Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование: идеи, методы, примеры. – М.: Физматлит, 2005. – 614 с.
 11. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. – М.: Наука, 1978. – 400 с.
 12. Миронов А.Н., Цветков К.Ю., Ковальский А.А., Пальгунов В.Ю. Методика обоснования возможности и условий продления назначенных показателей срока службы антенных систем наземных станций измерительного комплекса космодрома // Труды МАИ. 2018. № 99. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=91968>
 13. Грузков С.А. Электрооборудование летательных аппаратов. - М.: МЭИ, 2001. Т. 1. -568 с.
 14. Кириллов В.Ю., Клыков А.В., Томилин М.М. Моделирование переходных процессов усилителя тока двигателя рулевого привода самолёта // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 2. С. 175 - 184.
 15. Легконогих Д.С., Голев И.М., Преображенский А.П., Зеленин А.Н. Особенности применения электроприводных агрегатов в авиационных силовых установках // Труды МАИ. 2018. № 101. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=96338>
 16. Прангишвили И.В. Системный подход и общесистемные закономерности. - М.: СИНТЕГ, 2000. - 528 с.
-

17. Махутов Н.А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность. - Новосибирск: Наука, 2005. Ч. 2. - 610 с.
 18. Заковряшин А.И., Кошелькова Л.В. Оценка максимально допустимого времени применения сложного объекта по назначению // Труды МАИ. 2016. № 89.
URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=73384>
 19. Демидович Б.П., Марон И.А. Основы вычислительной математики. – М.: Лань, 2011. – 664 с.
 20. Марчук Г.И. Методы вычислительной математики. - СПб.: Лань, 2009. – 608 с.
-