МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР

МОСКОВСКОЕ ОРДЕНА ЛЕНИНА И ОРДЕНА ТРУДОВОГО
КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ
УЧИЛИЩЕ им. Н.Э.БАУМАНА

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

На правах рукописи

БЕЛКИН Игорь Леонидович

ИССЛЕДОВАНИЕ, РАЗРАБОТКА И СТАНДАРТИЗАЦИЯ МЕТОДОВ КОМПЛЕКСНОГО РЕШЕНИЯ ВОПРОСОВ НАДЕЖНОСТИ (НА ПРИМЕРЕ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ МОЩНОСТЬЮ от 75 до 400 кВт)

Специальность 08.00.20

Стандартизация и управление качеством продукции (промышленность)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Москва, 1979 г.

Работа выполнена во Всесоюзном научно - исследовательском институте по нормализации в машиностроении Государственного комитета СССР по стандартам

Научный руководитель:
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник А.И.Кубарев

Официальные оппоненты:
доктор технических наук, профессор Л.Ф.Шклярский
кандидат технических наук Д.Б.Плескачева

Ведущая организация:
Владимирский электромоторный завод

Защита диссертации состоится_____ 1979 г. в_____час. на заседании специализированного Совета К 053.15.16 по организации производства и стандартизации в Московском высшем техническом училище им.Н.Э.Баумана по адресу 107005,Москва,Б - 5, 2-я Бауманская,5.

С [illegible]отеке МВТУ.

_____ 1979 г.

Ю.Мымрин

М337937

НТБ МГТУ им.Н.Э.Баумана
1337937
Белкин И.П. Исследование,

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. В решениях XXV съезда КПСС указано: "Значительно улучшить качество выпускаемых машин, оборудования и приборов, повысить их технический уровень, производительность и надежность... Поднять роль стандартов в ускорении научно-технического прогресса и улучшении качества готовой продукции".

Проблема обеспечения надежности машин и, в частности, электродвигателей, остается в настоящее время достаточно острой. Экономические исследования показывают, что потери от недостаточной надежности многих типов машин превышают расходы на их производство.

Управление надежностью промышленных изделий осуществляется на предприятиях и в проектно-конструкторских организациях с помощью стандартов предприятия, разрабатываемых в полном соответствии с отраслевыми и государственными стандартами, однако, как показал анализ, номенклатура объектов стандартизации при этом определяется эмпирически.

ПЭЭ*4937 ф

Проблема выбора объектов стандартизации при управлении надежностью является в настоящее время актуальной. Для ее решения необходим комплексный подход, учет всех факторов пропорционально их весу и значимости. Решение указанной проблемы требует, по нашему мнению, привлечения общей теории систем, а также теоретического и экспериментального исследования надежности изделий, методов ее оценки и повышения, завершающегося комплексной стандартизацией.

Цель и задачи исследования. Целью настоящей диссертационной работы является исследование и разработка методов управления надежностью изделий с позиций системного подхода на примере одного типа машин – трехфазных асинхронных электродвигателей мощностью от 75 до 400 кВт, стандартизация и внедрение этих методов на одном из электромашиностроительных предприятий.

Задачи диссертационной работы состоят в: определении в терминах общей теории систем структуры и функций системы управления надежностью как составной части комплексной системы управления качеством продукции на предприятии; системном анализе проектирования, производства и эксплуатации электродвигателей мощностью от 75 до 400 кВт, а также действующей нормативно-технической документации; выполнении теоретических и экспери-

ментальных исследований надежности электродвигателей, методов ее оценки и повышения; разработке технического проекта системы управления надежностью электродвигателей как объекта комплексной стандартизации на предприятии; разработке стандартов предприятия по вопросам надежности, их внедрения и оценке экономической эффективности.

Методика исследования. За основу исследования взяты научные положения общей теории систем, теории надежности машин, теории вероятностей и математической статистики в сочетании с экспериментальными исследованиями надежности изделий и анализом производственного опыта. Все экспериментальные данные обработаны статистическими методами с применением ЭЦВМ.

Научная новизна. В диссертации получен ряд новых результатов:

I. На основе общей теории систем и программно-целевого подхода разработана структура комплекса стандартов по управлению надежности для машиностроительного предприятия. Структура охватывает стадии проектирования, подготовки производства, производства и эксплуатации.

2. Разработан метод расчета надежности обмоток электродвигателей из жестких секций, для него получены математическая модель надежности, расчетные формулы и алгоритм расчета.

3. Разработан метод расчета надежности подшипниковых узлов электродвигателей, основанный на применении теории преобразования случайных величин в предположении случайного характера сил одностороннего магнитного притяжения, зависящих от неравномерности воздушного зазора между статором и ротором.

4. Предложен метод ускоренных испытаний асинхронных электродвигателей с принудительным пробоем изоляции. Данным методом исследована надежность двигателей А3-315 и 4АН-280, для чего разработан и изготовлен стенд ускоренных испытаний.

5. Дан метод оценки показателей надежности изделий при непрерывном плане наблюдений. Показано, что такой план приводит к многократным усеченным выборкам, получены расчетные формулы для оценки вероятности безотказной работы для распределения наработок изделий по закону Вейбулла.

МВТУ им. Н.Э. Баумана ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ БИБЛИОТЕКА

Практическая ценность. Использование полученных результатов позволяло дать рекомендации по повышению надежности двигателей 4АН-280 и разработать комплекс стандартов предприятия по

вопросам надежности в составе комплексной системы управления качеством продукции.

Реализация в промышленности. Результаты исследований внедрены на Московском электромеханическом заводе им.Владимира Ильича. Экономический эффект от внедрения согласно акту составляет 671 тыс.руб. в год.

Апробация работы. Материалы диссертации были доложены на:

1. Всесоюзной научно-технической конференции "Ускоренные методы испытаний на надежность технических систем"(г.Минск, 1972).

2. Всесоюзном научно-техническом семинаре по опыту работы служб надежности (г.Пермь, 1972).

3. Семинаре по опыту работы ВНИИНМАШ и Московского электромеханического завода им.Владимира Ильича (Москва,Колонный зал Дома Союзов, 1975).

4. Всесоюзной научно-технической конференции "Методы повышения надежности механических систем и их стандартизация" (г.Смоленск, 1976).

5. Секции надежности отраслевого научно-технического совета Министерства электротехнической промышленности (г.Тирасполь, 1978).

6. Кафедре "Метрология и взаимозаменяемость" МВТУ имени Н.Э. Баумана (1979).

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 14 статьях.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы и трех приложений. Работа содержит 142 стр.машинописного текста, 34 рисунка, 26 таблиц, 170 наименований литературных источников и 16 стр. приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность комплексного рассмотрения проблемы обеспечения надежности изделий машиностроения,приведены выдержки из решений Партии и Правительства по вопросам качества, надежности и стандартизации,действующих государственных стандартов и других нормативных документов, сформулирована цель работы и показано содержание ее отдельных глав.

В первой главе диссертации дан обзор основных направлений решения проблемы надежности в машиностроении, краткий обзор

общей теории и математических методов теории систем, имеющих перспективу приложения к задачам стандартизации, рассмотрено современное состояние стандартизации методов обеспечения надежности машин в стране и за рубежом. Здесь же рассмотрены методы повышения надежности электрических машин, как объект стандартизации, и состояние нормативно-технической документации по этому вопросу. В последнем параграфе главы сформулированы задачи диссертации.

Надежность изделий закладывается при проектировании, создается при производстве и реализуется при эксплуатации.

В процессе проектирования изучаются процессы, действующие на машину, проводится расчет изменения машиной начальных параметров и предельных состояний, расчет показателей надежности, рассматриваются методы повышения надежности за счет конструктивных факторов.

В процессе производства организуется бездефектный выпуск продукции, применяются технологические методы повышения надежности, организуется контроль качества продукции и технологического процесса.

В процессе эксплуатации проводятся техническое обслуживание и ремонт изделий, их восстановление, контроль надежности, сбор и обработка информации.

Таким образом, надежность машин определяется многими факторами и требует для своего изучения системного подхода.

Анализ различных теоретических подходов к изучению систем показал, что к задачам построения систем обеспечения надежности на базе стандартизации могут найти применение следующие разделы теории систем:

- теория декомпозиции, основанная на применении неравенства Буля;
- теория стратификации, входящая в состав теории многоуровневых иерархических систем;
- теория классификации систем;
- программно-целевой метод планирования систем;
- теория потенциальной эффективности сложных систем.

Анализ государственных стандартов в области надежности машин показал, что задачи надежности отражены следующими группами стандартов: организационно-техническими; стандартами норм и требований; стандартами на материалы; стандартами конструкций;

стандартами на методы расчета; стандартами на технологические процессы; стандартами на методы контроля; стандартами на методы испытаний; стандартами системы технического обслуживания и ремонта; метрологическими стандартами; стандартами системы сбора и обработки информации; системами стандартов ЕСКД, ЕСТПП и др.

Стандартизация в области обеспечения надежности проводится также на отраслевом уровне и на уровне предприятий. Так в составе известных Комплексных систем управления качеством продукции (КСУКП), таких как НОРМ, КАНАРСПИ, Львовской КСУКП и др. действуют стандарты по управлению надежностью изделий.

Исследованию методов повышения надежности электрических машин и их стандартизации посвящено большое число работ в следующих направлениях:

анализ причин и видов отказов;

разработка математических моделей отказов;

разработка методов расчета надежности при проектировании;

разработка методов ускоренных испытаний;

исследование влияния конструктивно-технологических факторов;

исследование влияния эксплуатационных факторов;

исследование организационных и экономических вопросов обеспечения надежности.

Анализ показал, что наименее исследованными оказываются методы обеспечения надежности асинхронных электродвигателей мощностью от 100 до 400 кВт. В настоящей работе предпринята попытка восполнить этот пробел.

Во второй главе диссертации проводятся анализ и систематизация методов управления надежностью машин с позиций общей теории систем и программно-целевого подхода, формулируются цели, задачи, принципы, структура и функции системы управления надежностью на базе стандартизации.

Декомпозиция КСУКП может проводиться по следующим классификационным признакам: уровни управления качеством, стадии "жизни" изделия, виды продукции, показатели качества продукции и др.

Рассматривая в качестве основного классификационного признака показатели качества машины и пользуясь неравенством Буля, можно оценивать вероятность достижения целей КСУКП через вероятности получения оптимальных (по некоторому критерию) показа-

телей качества: технико-экономических, надежности, технологичности и др. Анализ показывает, что для многих машин, в том числе электрических, эта вероятность почти полностью определяется вероятностью получения оптимальной надежности изделия.

Теория стратификации систем позволяет определить основные элементы системы управления надежностью изделий на промышленном предприятии. Система моделируется на трех стратах: страте производства, страте управления и страте стандартизации. Схема стратификации дана на рис.I

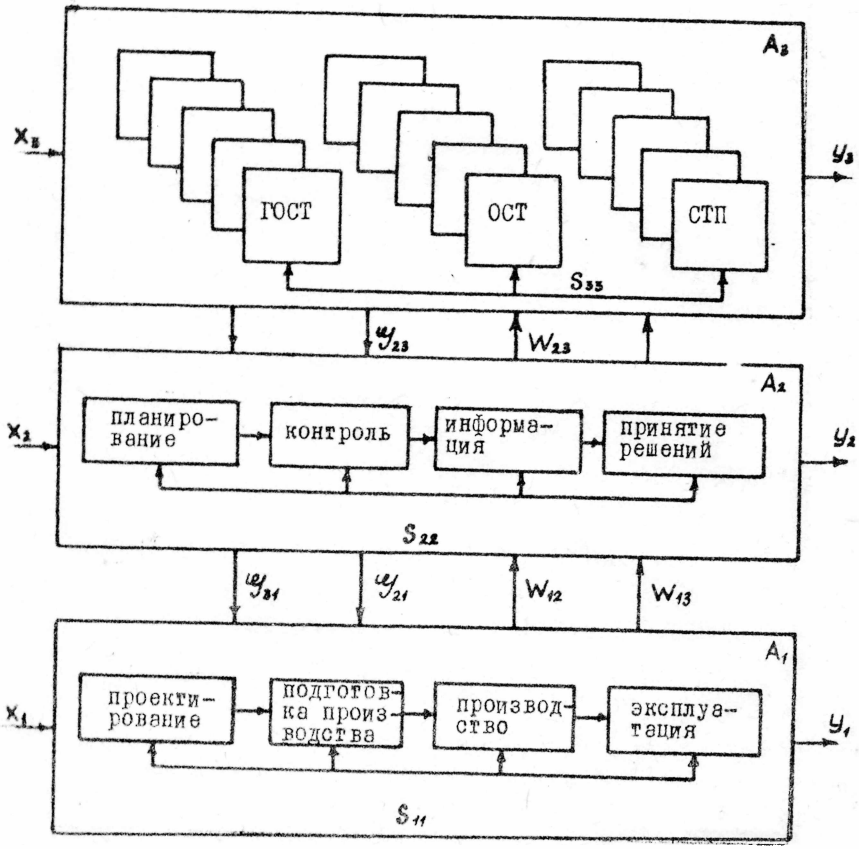


Рис. I. Схема стратификации системы.

Взаимодействие страт формализуется матричным уравнением:

$$\begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} S_{11} & W_{12} & W_{13} \\ \Psi_{21} & S_{22} & W_{23} \\ \Psi_{31} & \Psi_{32} & S_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \end{pmatrix}$$

где X - стимулы; Y - отклики; S, W, Ψ - связи.

Раскрывая его по отдельным связям и интерпретируя их с учетом опыта промышленности, получена структура программы обеспечения надежности изделий на промышленном предприятии.

В третьей главе диссертации на основании программы, разработанной во второй главе, осуществляется разработка технического проекта комплексной стандартизации на предприятии методов обеспечения надежности трехфазных асинхронных электродвигателей мощностью от 75 до 400 кВт, для чего рассматриваются конструктивно-технологические особенности данного класса двигателей (А3-315, 4АН-280), процесс их проектирования и производства, виды и причины отказов при эксплуатации.

Технический проект содержит следующие разделы:

1. Общие положения, определяющие структуру и функции служб предприятия по обеспечению надежности двигателей.

2. Регламентация требований и расчет надежности, предлагающий разработку методов расчета надежности двигателей на стадии проектирования, в частности расчета надежности изоляции и подшипниковых узлов.

3. Испытания на надежность.

Раздел предполагает разработку методов и средств испытаний макетов элементов двигателей и ускоренных испытаний опытных и серийных образцов.

4. Сбор и обработка информации о надежности: планирование наблюдений, организация сбора информации, оценка надежности по статистическим данным.

5. Принятие решений: порядок согласования и утверждения мероприятий по повышению надежности, расчет экономической эффективности.

6. Конструктивные методы повышения надежности: типовые конструкции и решения.

7. Технологические методы повышения надежности: типовые технологические процессы.

8. Обеспечение надежности в производстве:контроль качества материалов,деталей,сборочных единиц,бездефектное изготовление продукции,приемо-сдаточные,типовые и периодические испытания.

9. Обеспечение надежности при эксплуатации: инструктаж потребителей,эксплуатационная и ремонтная документация, подконтрольная эксплуатация.

Четвертая глава диссертации содержит результаты исследований методов оценки и контроля надежности трехфазных асинхронных двигателей мощностью от 75 до 400 кВт с целью стандартизации этих методов на промышленном предприятии.

Надежность двигателя лимитируется в основном надежностью изоляции статора и подшипниковых узлов.

Математическая модель надежности рядовых обмоток из жестких секций строится на основе модели "слабейшего звена". Эта модель учитывает вероятность превышения действующего напряжения над пробивным. Для первого было принято распределение, полученное Н.И.Суворовым. Второе было получено автором экспериментально путем пробоя секций обмоток двигателей А3-315 и 4АН-280 в макете статора. Обработка результатов экспериментов показала, что пробивные напряжения распределены по закону Вейбулла

$$F(u) = 1 - e^{-\lambda u^{\beta}}$$

с параметрами:

$$0{,}0025 \leq \lambda \leq 0{,}0463; \qquad 1{,}95 \leq \beta \leq 3{,}734$$

Полученная математическая модель надежности рядовых обмоток имеет вид:

$$P(t) = \prod_{i=1}^{n} \left\{ \int_{1}^{\infty} \left\{ \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\kappa-1)^2}{0{,}32} \right] + 0{,}168(\kappa-1)^{2{,}5} \exp\left[-\frac{(\kappa-1)^{3{,}5}}{12{,}5} \right] \right\} \exp \lambda N \kappa^{\beta} d\kappa \right\}^{\nu t}$$

где: $P(t)$ – вероятность безотказной работы за время t часов;

κ – кратность коммутационных перенапряжений;

N – число витков обмотки;

ν – частота коммутаций.

С помощью данной модели был построен алгоритм расчета надежности обмоток на ЭВМ "Наири-2" и рассчитаны надежности обмоток ряда двигателей. Результаты некоторых расчетов приведены в табл. I.

Таблица I

Тип двигателя	Вероятность безотказной работы P(t). Наработка, t час		
	2000	5000	I0000
АЗ-3I5-М2	0,985I	0,9565	0,9062
АЗ-3I5-М4	0,962I	0,9087	0,8I79
АЗ-3I5-М8	0,9908	0,9759	0,9434

Математическая модель надежности подшипниковых узлов электродвигателей строится исходя из известной формулы долговечности подшипников качения при усталостных отказах. Рассматривая приведенные нагрузки как случайные величины и применяя теорию преобразования случайных величин, какими являются: нагрузки, электромагнитное притяжение и эксцентриситет ротора, обусловленный технологическими погрешностями, получаем функции распределения наработок на отказ подшипниковых узлов со стороны свободного и рабочего концов вала машины, соответственно:

$$F_1(t) = \exp\left[-\frac{1}{18\sigma^2 D^2 L^2 \beta^2}\left(\frac{C_n l}{K_\delta (1+mK) n^{0,3} t^{0,3}} - G\beta - P_c\right)^2\right]$$

$$F_2(t) = \exp\left[-\frac{1}{18\sigma^2 D^2 L^2 a^2}\left(\frac{C_n l}{K_\delta n^{0,3} t^{0,3}} - Ga - P(l+c)\right)^2\right]$$

где: σ – параметр распределения Рэлея; D, L, a, β, c, l – геометрические параметры машины; G и P – вес ротора и реакция передачи; C_n – коэффициент работоспособности подшипника; n – скорость вращения; K_δ, m, K – коэффициенты приведения; t – срок службы.

Разработанный на основе данной математической модели алгоритм расчета надежности подшипниковых узлов двигателей позволил провести оценку их надежности при проектировании. Результаты расчетов для двигателя АЗ-3I5-2 даны в табл. 2.

Для проведения ускоренных испытаний двигателей АЗ-3I5 и 4АН-280 был разработан экспериментально-расчетный метод, заключающийся в следующем. Испытания проводились в режиме реверсов на холостом ходу и в режиме взаимной нагрузки. Режимы испытаний выбирались согласно РТМ ОАА.688.009-74 (в дальнейшем по ОСТ

16.0.510.033-77). На испытания ставились одна-три машины. При таком объеме выборки доверительная вероятность испытаний получается весьма низкой. С целью извлечения максимально возможной информации по окончании каждого цикла испытаний проводился пробой изоляции секций одной машины (для одной машины - по окончанию испытаний) и вероятность безотказной работы рассчитывалась по математическим моделям, приведенным выше. Для проведения испытаний был разработан и изготовлен стенд, состоящий из трех термовлагокамер, пульта управления и системы регистрации. Температура регистрировалась с помощью термопар, установленных под клин паза обмотки статора. По результатам испытаний были даны рекомендации по повышению надежности двигателей 4АН-280.

Таблица 2

Вероятность безотказной работы						
	Подшипник 32317			Подшипник 2317		
t ч.	3600	10800	18000	3600	10800	18000
$P(t)$	0,994	0,976	0,964	0,996	0,984	0,976

С целью обработки эксплуатационной информации об отказах был рассмотрен следующий план наблюдений: под наблюдения ставились все двигатели на данном эксплуатирующем предприятии независимо от сроков их постановки на эксплуатацию, снятия с эксплуатации или отправки в ремонт в связи с отказом. Такой план наблюдений был назван непрерывным. В работе показано, что непрерывный план приводит к образованию многократно-усеченных выборок и получены методом максимума правдоподобия оценки показателей надежности для распределения Вейбулла $P(t) = e^{-\lambda t^{\beta}}$,

$$\hat{\lambda} = \frac{d}{\sum_{i=1}^{d} t_i^{\hat{\beta}} + \sum_{j=1}^{N-d} t_j^{\hat{\beta}}};$$

$$\left(\frac{d}{\hat{\beta}} + \sum_{i=1}^{d} t_i^{\hat{\beta}}\right)\left(\sum_{i=1}^{d} t_i^{\hat{\beta}} + \sum_{j=1}^{N-d} t_j^{\hat{\beta}}\right) - \hat{\lambda}\left(\sum_{i=1}^{d} t_i^{\hat{\beta}} \ln t_i + \sum_{j=1}^{N-d} t_j^{\hat{\beta}} \ln t_j\right) = 0$$

где: d - число отказов; N - общее число машин; t_i - наработки с отказами; t_j - наработки без отказов.

Данным методом оценены показатели надежности двигателей АКЭМ, эксплуатируемых на Московском метрополитене.

Сопоставление результатов расчетов надежности, ускоренных испытаний и эксплуатационных оценок надежности даны на рис.2.

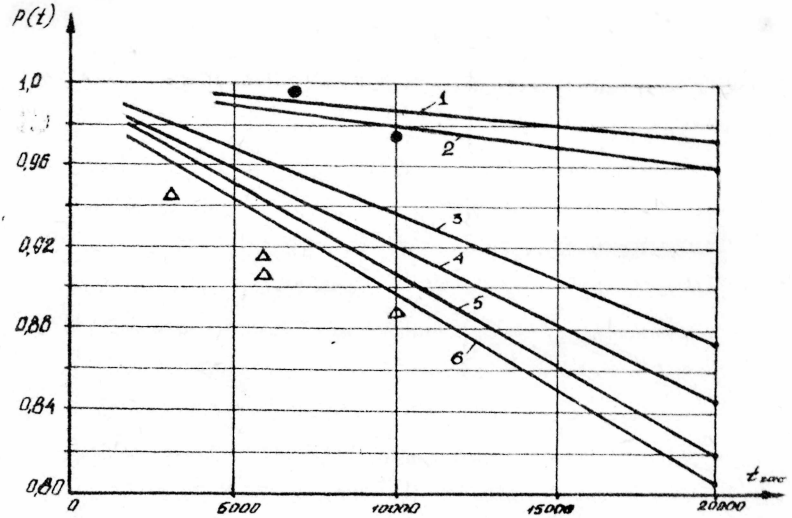


Рис.2. Сопоставление результатов расчетов и испытаний.

где: ВБР подшипниковых узлов: ● - по данным эксплуатации; I,2 - по данным расчетов.

ВБР обмотки: ▲ - по данным эксплуатации; 3,5 - по данным расчетов (на основании испытаний макетов); 4,6 - по результатам ускоренных испытаний (для двигателей АЗ-3I5S-2 и АЗ-3I5М-2 соответственно).

В настоящей главе приведены также результаты анализа стабильности техпроцесса с помощью контрольных и статистических зон.

<u>В пятой главе</u> диссертации изложены результаты работ по стандартизации системы управления надежностью электродвигателей на предприятии и проводится оценка ее эффективности.

Комплекс стандартов предприятия Московского электромеханического завода им.Владимира Ильича содержит 72 СТП и разработан техническими службами завода согласно программы, изложенной во второй и третьей главах диссертации. I8 стандартов разработаны при непосредственном участии автора по материалам исследований, изложенным в четвертой главе(отмечены х) в табл.3).

Таблица 3

Комплект СТП по надежности электродвигателей

СТП ОБА.690.007-75[x)]

Система обеспечения надежности электродвигателей. Основные положения

Стадия проектирования

СТП ОБА.690.006-75[x)]
Номенклатура показателей надежности.

СТП ОБА.690.022-76[x)]
Расчет надежности изоляции

СТП ОБА.680.023-76[x)]
Расчет надежности подшипниковых узлов.

СТП ОБА.682.003-74[x)]
Расчет технических зон испытаний

СТП ОБА.682.004-74[x)]
Расчет контрольных зон испытаний.

СТП ОБА.689.020-75[x)]
Ускоренные испытания.

СТП ОБА.690.021-76[x)]
Испытания макетов изоляции

СТП (8 наимен.)
Конструкции изоляции.

Стадия производства

СТП ОБА.415-014-71
Приемка изоляционных и проводниковых материалов.

СТП ОБА.476.000-71
Испытание изоляции обмоток статора напряжением

СТП ОБА.476.001-71
Испытание диэлектриков

СТП ОБА.682.006-75[x)]
Приемо-сдаточные испытания.

СТП ОБА.682.007-75[x)]
Периодические испытания.

СТП ОБА.682-005-75[x)]
Типовые испытания.

СТП ОБА.682-009-75[x)]
Расчет изменения параметров с помощью контрольных зон испытаний.

Стадия подготовки производства

СТП ОБА.684.002-75
Правила разраб.и применения техпроцессов.

СТП ОБА.684.003-75
Правила обеспечения технологичности конструкции деталей.

СТП ОБА.684.004-75
Правила обеспечения технологичности конструкций сборочных единиц.

СТП ОБА.684.005-75
Правила обеспечения технологичности конструкции электродвигателей.

СТП ОБА.682.008-75[x)]
Расчет экономич.эффективности повышения надежности

СТП (41 наимен.) Типовые технологические процессы

Стадия эксплуатации

СТП ОБА.689.012-74[x)]
Порядок сбора эксплуатационной информации[x)].

СТП ОБА.689.016-73[x)]
Требования к эксплуатационной документации.

СТП ОБА.689.019-76[x)]
Порядок постановки на подконтрольную эксплуатацию.

СТП ОБА.682.001-74[x)]
Оценка надежности по данным эксплуатации.

СТП ОБА.682.002-74[x)]
Непрерывный план наблюдений.

Основополагающий стандарт системы (СТП ОБА.690.007-75) разработан автором совместно с отделом качества и надежности ЗВИ и содержит:

I. Цели и задачи системы управления надежностью двигателей.

2. Структуру системы.

3. Функции служб и подразделений завода в системе.

4. Перечень стандартов предприятия, подлежащих разработке.

Внедрение системы управления надежностью двигателей позволило сократить сроки доводки изделий при проектировании и повысить надежность продукции.

Оценка экономической эффективности внедренных элементов системы была проведена по методикам оценки экономической эффективности повышения качества электродвигателей ОТЛ.I29OI6 ЦПК ТБКЭМ и ОТЛ.I29OI ЦПКТБКЭМ. Экономический эффект составляет 67I тыс.руб. в год и подтвержден актом завода.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

I. На основе общей теории систем и программно-целевого подхода разработана структура методов комплексного решения вопросов надежности в рамках комплексной системы управления качеством продукции на машиностроительном предприятии. Структура содержит методы прогнозирования, испытаний и контроля надежности, а также конструктивно-технологические методы повышения надежности.

2. Проведен анализ процессов проектирования, подготовки производства, производства и эксплуатации асинхронных электродвигателей мощностью от 75 до 400 кВт, выявлены причины отказов двигателей и предложена программа комплексной стандартизации методов обеспечения их надежности.

3. Установлено, что надежность асинхронных электродвигателей мощностью от 75 до 400 кВт лимитируется пробоями изоляции обмоток и разрушениями подшипниковых узлов, на которые приходится соответственно 90% и 8% всех отказов.

4. Проведено исследование и разработка методов прогнозирования, расчетов и ускоренных испытаний надежности электродвигателей мощностью от 75 до 400 кВт .

Получена функция надежности электродвигателя на различных стадиях процессов производства и эксплуатации:

– на этапе технического проектирования в результате выполнения расчетов согласно предложенных математических моделей надежности рядовых обмоток из жестких секций и подшипниковых узлов;

–на стадии изготовления и испытания опытных образцов в результате экспериментальных исследований пробивных напряжений на макетах,а также методом ускоренных испытаний с принудительным пробоем изоляции и расчетом надежности по математическим моделям,разработанным для условий многономенклатурного производства и апробированным на электродвигателях А3-315 и 4АН-280;

– на стадии эксплуатации с использованием математической модели,являющейся следствием непрерывного плана наблюдений и метода максимального правдоподобия для многократно усеченных выборок.

5.Согласно проведенным расчетам и экспериментам ресурс электродвигателей типа А3-315 распределен по закону Вейбулла и составляет 10000 час. при вероятности безотказной работы 0,73-0,98, что согласуется со статистическими данными эксплуатации.

6.Анализ стабильности технологического процесса производства электродвигателей А3-315,проведенный с помощью статистических зон параметров приемо-сдаточных испытаний,показал правомерность распространения результатов испытаний малых выборок на всю серию.

7.Внедрение системы управления надежностью электродвигателей на Московском электромеханическом заводе им.Владимира Ильича(72 стандарта предприятия,из которых 18 стандартов разработаны по материалам диссертации) позволило повысить долговечность ряда типоисполнений двигателей А3-315 и 4АН-280 на 10-15% за счет внесения конструктивно-технологических изменений и сократить сроки доводочных испытаний на 3 – 4 месяца.

Список опубликованных работ по теме диссертации.

1.Белкин И.Л.Контроль надежности электродвигателей на стадии проектирования.Труды ВНИИНМАШ,вып.XIX,Москва,1974.

2.Белкин И.Л.Математическая модель надежности витковой изоляции трехфазных асинхронных двигателей с жесткими секциями. Труды ВНИИНМАШ,вып.XXУ,Москва,1975.

3.Белкин И.Л.Расчет надежности подшипниковых узлов асинхронного электродвигателя с учетом неравномерности воздушного зазора между ротором и статором.Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции"Методы повышения надежности ме-

ханических систем и их стандартизация", Смоленск, 1976.

4. Белкин И.Л., Немцев Г.Г., Приходько А.П. Об ускоренных испытаниях асинхронных двигателей мощностью от 100 до 1000 кВт. "Экспресс-стандарт", № 37, 1972.

5. Белкин И.Л., Немцев Г.Г. Ускоренные испытания асинхронных электродвигателей мощностью от 100 до 1000 кВт с изоляцией класса "В". Всесоюзная научно-техническая конференция "Ускоренные методы испытаний на надежность технических систем", тезисы докладов, Москва, 1972.

6. Немцев Г.Г., Смехов Ю.Д., Белкин И.Л., Климов Ю.Ф. Роль служб качества Московского электромеханического завода имени Владимира Ильича в обеспечении надежности асинхронных двигателей. Тезисы докладов Всесоюзного научно-технического семинара по опыту работы служб надежности, Пермь, 1972.

7. Белкин И.Л., Мурзенко В.С. Контроль качества асинхронных электродвигателей с помощью зон испытаний. Труды ВНИИНМАШ, вып.XIX, Москва, 1974.

8. Белкин И.Л., Смехов Ю.Д., Мурзенко В.С., Гайнутдинов В.С. Стенд ускоренных испытаний электродвигателей мощностью до 200 кВт.

9. Белкин И.Л., Немцев Г.Г. Ускоренные испытания статорных обмоток асинхронных двигателей мощностью от 100 до 1000 кВт. В сб.: "Ускоренные испытания на надежность технических систем", изд-во стандартов, Москва, 1974.

10. Верченко В.Р., Белкин И.Л. Основные направления решения проблемы надежности изделий машиностроения и приборостроения. Труды ВНИИНМАШ, вып. XXII, Москва, 1975.

11. Аронов И.З., Белкин И.Л., Долгопольский Л.Н. Обобщенный план испытаний на надежность. Труды ВНИИНМАШ, вып, XXII, Москва, 1975.

12. Белкин И.Л., Аронов И.З., Долгопольский Л.Н., Смехов Ю.Д. Оценка надежности изделий по результатам эксплуатации, "Экспресс-стандарт", № 42, 1975.

13. Петров Ю.Н., Белкин И.Л. Система обеспечения надежности электродвигателей на Московском электромеханическом заводе имени Владимира Ильича, "Стандарт, экспресс-информация", № 11, 1976.

I4. Белкин И.Л., Никифоров А.Г. СТП на расчет экономической эффективности от повышения уровня надежности электродвигателей. "Стандарт, экспресс-информация", № II, I976.

Л-97024. Подп. к печ. 25.04.79 г. Объем I п.л. Зак.624.Тир.I00

Ротапринт МВТУ. I07005, Москва, Б-5, 2-я Бауманская, д. 5