

1654

Челябинский государственный технический университет

На правах рукописи

СОРОКИН АЛЕКСЕЙ ВИКТОРОВИЧ

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТОЧНОСТИ
ОСНОВНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
ВЗРЫВОЗАЩИЩЕННЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

(Специальность 05.02.08 - "Технология машиностроения")

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск - 1993

Работа выполнена в Научно-исследовательском, проектно-конструкторском и технологическом институте взрывозащищенных электрических машин и аппаратов научно-производственного объединения "Кузбассэлектромотор".

Научный руководитель: кандидат технических наук,
доцент Полетаев В.А.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Качаев В.Н.

кандидат технических наук,
доцент Свиридов Ю.Н.

Ведущее предприятие: производственное объединение
"Челялектромаш", г. Новая Каховка

Защита диссертации состоится 16 октября 1993 года
в 15 часов на заседании специализированного совета ДО 53.13.05
в Челябинском государственном техническом университете по ад-
ресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Челябин-
ского государственного технического университета.

Автореферат разослан 16 декабря 1992 г.

Ученый секретарь
специализированного совета,
доктор экономических наук,
профессор

И.А.Баев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Асинхронные двигатели (АД) являются одним из наиболее массовых видов продукции электротехнической промышленности. Их ежегодный выпуск в СНГ (по установленной мощности) составляет 50 млн. кВт. АД мощностью до 100 кВт потребляет более 40 % вырабатываемой в странах СНГ электрэнергии. В этих условиях проблема повышения энергетических характеристик АД, в частности, КПД имеет особенно важное значение, поскольку ее решение обеспечивает значительную экономию энергетических и материальных ресурсов и повышение эксплуатационных характеристик приводного оборудования. Поэтому, в конечном счете, качественные характеристики АД являются одним из значимых факторов, определяющих технический уровень производства.

Точность выходных энергетических показателей АД определяется находящимися с ними в зависимости функциональными параметрами, среди которых, как показывают результаты исследований ряда авторов (Полетаева В.А., Розенко Н.Г., Воскресенского А.П. и др.), наибольший долевой вклад (более 60 %) имеют параметры точности радиального воздушного зазора между статором и ротором, причем, как равномерной, так и неравномерной его составляющих. Следовательно, достижение требуемой точности важнейших геометрических параметров АД является одним из наиболее действенных путей обеспечения заданных показателей качества АД.

Взрывозащищенные АД используются в качестве приводов в химической, нефте-, газо- и горнодобывающей промышленности. Специфика эксплуатации данных АД (в условиях взрывоопасной среды) предопределяет такие особенности их конструкции и технологии изготовления, которые создают значительные трудности в обеспечении в них необходимой точности воздушного зазора. Поэтому проблема точности воздушного зазора имеет для взрывозащищенных АД особую остроту.

В связи с вышеизложенным, задача разработки методов обеспечения точности основных геометрических параметров взрывозащищенных АД является весьма актуальной.

Диссертационная работа связана с научно-исследовательскими работами, выполненными по заказ-нарядам Д0286629-ЗД72, Д72.88-89.26, Д72.89-90.23, Д0287689-ЗД72, Д0287676-ЗД72 в соответствии с планами НИР НИИ ВЭМ НПО "Кузбассэлектромотор" на период 1982-1990 годов.

Целью работы является разработка системы расче-

тных, технологических и конструкторских методов обеспечения необходимой точности параметров воздушного зазора взрывозащищенных АД.

Методы исследования. При выполнении работы использовались методы математической статистики, теории вероятностей, математического анализа, теории точности, расчетные методы сопротивления материалов, методы планирования экспериментов, методы расчета размерных цепей. Расчеты выполнены с использованием ЭВМ.

Научная новизна. В работе получены следующие основные новые научные результаты:

1. Определены основные закономерности формирования точностных параметров, в том числе параметров размерной нестабильности, а также параметров напряженно-деформированного состояния деталей и сборочных единиц взрывозащищенных АД в процессе изгото-вления.

2. Разработаны методика размерного анализа сопряжения "статор-ротор" и методика поверочного расчета размерной цепи пространственного воздушного зазора (ПВЗ) АД, основанные на определении параметров точности воздушного зазора для всего объема пространства между поверхностями статора и ротора.

3. Построена математическая модель динамического ПВЗ АД, учитывающая все основные конструктивные, точностные и эксплуатационные параметры АД, определяющие величину воздушного зазора и его погрешности.

4. Разработана методика расчета допусков на погрешности формы продольных сечений статора и ротора исходя из условия получения величины ПВЗ в пределах заданного допуска.

5. Созданы математические модели и определены основные физические закономерности формирования точностных параметров отверстия статора АД, отражающие совместное влияние на точность отверстия всех значимых конструктивных и точностных параметров станины и сердечника статора, а также технологических параметров в процессе сборки сердечника со станиной.

6. Разработана методика расчета размеров и допусков геометрических параметров сборочных единиц статоров из условия получения точностных параметров отверстия статора в пределах допусков.

7. Разработаны теоретические основы гидровибрационного метода размерной стабилизации корпусных деталей взрывозащищенных АД. Теоретически обоснован разработанный метод гидроиспытания корпусных станин взрывозащищенных АД на взрывоустойчивость, основанный на совмещении операции гидроиспытания с гидровиброобработкой. Построены математические модели процесса гидровиброобработки станин, ха-

рактеризующие влияние режимов гидровиброобработки на снижение остаточных напряжений, изменение геометрических параметров и параметров размерной нестабильности станин.

8. Разработан экономичный метод оперативного контроля в условиях действующего производства параметров размерной нестабильности станин взрывозащищенных АД по величинам растягивающих и сжимающих остаточных напряжений.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

1. Выявленные закономерности формирования точностных параметров и параметров напряженно-деформированного состояния деталей и сборочных единиц двигателей позволяют обоснованно определять направления совершенствования технологии изготовления для обеспечения точности параметров воздушного зазора взрывозащищенных АД.

2. Разработанная методика размерного анализа сопряжения "статор-ротор" обеспечивает повышение точности результатов расчетов точностных параметров воздушного зазора. Это, в свою очередь, обеспечивает повышение эффективности мероприятий, разрабатываемых на основе этих результатов и направленных на повышение точности воздушного зазора.

3. Разработанная методика поверочного расчета размерной цепи ПВЗ АД позволяет получать значения величины воздушного зазора в заданных допуском пределах во всем объеме пространства между поверхностями статора и ротора.

4. Созданная модель динамического ПВЗ позволяет выявлять превалирующие факторы, определяющие точность воздушного зазора, и обоснованно определять пути управления ею как на стадии проектирования, так и на стадии изготовления АД.

5. Предложенная методика расчета допусков на погрешности формы продольных сечений статора и ротора обеспечивает получение поля рассеяния величины воздушного зазора в пределах поля допуска.

6. Полученные математические модели формирования точностных параметров отверстия статора АД позволяют выявлять доминирующие конструктивные, точностные и технологические параметры, определяющие значения точностных параметров отверстия статора, и производить обоснованный выбор путей управления его точностью на стадиях проектирования и изготовления АД.

7. Разработанная методика расчета размеров и допусков геометрических параметров станин и сердечников статоров обеспечивает получение точностных параметров отверстия статора в пределах по-

пусков на стадиях проектирования и изготовления АД.

8. Разработанный гидровибрационный метод снижения остаточных напряжений позволяет практически без повышения себестоимости изготовления достичь высокой стабильности во времени геометрических параметров корпусных деталей и за счет этого снизить неравномерность воздушного зазора (НВЗ) АД.

9. Предложенный метод контроля параметров размерной нестабильности станин взрывозащищенных АД позволяет производить оперативную корректировку режимов гидровиброобработки станин в действующем производстве, что обеспечивает повышение показателей стабильности их размеров.

10. Разработанная система технологических и конструкторских методов обеспечения точности геометрических параметров взрывозащищенных АД позволяет без существенного увеличения затрат повысить точность обработки деталей и сборки АД, а также усовершенствовать конструкцию двигателей и за счет этого обеспечить показатели точности воздушного зазора АД в заданных допусками пределах.

Реализация результатов работы. По результатам работы разработаны и внедрены в НПО "Кузбассэлектромотор" "Методика расчета размеров и допусков геометрических параметров сборочных единиц статоров. БЯИ.520033.007" и Технологическая инструкция № 25000.00136 "Статистический контроль и расчет точности объемного воздушного зазора электродвигателей", используемые при проектировании технологии изготовления и конструкций новых моделей и корректировке геометрических параметров и технологии изготовления выпускаемых взрывозащищенных АД. Успешно прошел испытания в НИИ ВЭМ НПО "Кузбассэлектромотор" и рекомендован к внедрению в 1994 году на головном заводе объединения гидровибрационный метод стабилизации корпусных деталей АД. Суммарный годовой экономический эффект от внедрения разработок в 1992 году составил 490,59 тыс.руб.

Апробация. Содержание работы и ее результаты до - кладывались и обсуждались на VI и VII научно-технических конференциях "Повышение надежности, экономичности и конкурентоспособности асинхронных электродвигателей и электроприводов" (г. Кемерово, 1989, 1992 гг.), на Республиканской научно-технической конференции "Электромеханические преобразователи и многофункциональные системы" (г. Томск, 1991 г.), на Всесоюзной научно-технической конференции "Интеллектуальные электродвигатели и экономия электроэнергии" (г. Суздаль, 1991 г.), на научно-технических за-

седаниях секции "Технологии изготовления электрических машин и низковольтной аппаратуры" (НИИ ВЭи НПО "Кузбассэлектромотор", г. Кемерово, 1987-1991 гг.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 33 печатных работы, в том числе получено 9 авторских свидетельств на изобретения, а также составлено 3 отчета о НИР, зарегистрированных во ВНИЦентре.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и содержит 211 страниц машинописного текста, 25 рисунков, 19 таблиц, список использованной литературы из 172 наименований и 7 приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ВВЕДЕНИЕ. Обоснована актуальность и определена цель работы.

I. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

Производственные данные по видам брака взрывозащищенных АД, выпускаемых НПО "Кузбассэлектромотор", свидетельствуют, что из всех видов брака "затирь" ротора о статор составляют 23,4-28,3% и занимают по количеству первое место. В значительной степени такое положение обусловлено неизученностью закономерностей формирования точностных параметров воздушного зазора во взрывозащищенных АД в процессе их изготовления. С целью выявления таких закономерностей было проведено статистическое исследование технологического процесса изготовления статор-комплекта взрывозащищенных АД, на долю погрешностей которого приходится наибольшая часть (77%) формирующейся НВЗ. В результате исследования установлено следующее. Окончательная точность отверстия станин имеет слабую корреляционную связь с его точностными параметрами на промежуточных операциях изготовления и формируется практически полностью на операции второго порнования, где она тем выше, чем больше натяг порнования. После порнования погрешности размера и формы отверстия станин в торцовых сечениях значительно превышают погрешности в средних сечениях, что обусловлено явлением "краевого эффекта" при порновании. После изготовления средний диаметр отверстия у 98,0%, а некруглость у 24,6 % станин превышают допускаемые значения. Окончательная картина напряженного состояния станин характеризуется большими полями и величинами растягивающих остаточных напряжений,

что обуславливает значительную нестабильность размеров станин во времени. Из-за нестабильности размеров станин и подшипниковых щитов эксцентрикитет оси ротора к моменту поступления АД на испытательную станцию возрастает у АД В, ВРП180\$4 на 36,8 %, у АД В, ВРП180\$6, 8 - на 39,4 %. Это приводит к увеличению относительной НВЗ, соответственно, на 10,2 и 17,9 %. После сборки сердечника статора со станиной более 1/3 статоров не соответствуют требованиям чертежа по точности диаметра отверстия статора, от 1/4 до 1/3 количества статоров имеют некруглость отверстия, превышающую допускаемую. Следующая после сборки обработка отверстия статора методом раскатывания не обеспечивает существенного повышения его точности.

Корреляционным анализом технологического процесса изготовления статоров установлено, что значимыми параметрами, определяющими формирование точностных параметров отверстия статора, являются величины радиуса R_n и некруглости φ_n отверстия сердечника статора перед запрессовкой в станину, величины некругостей φ_{pn} наружной поверхности сердечника и φ_{st} отверстия станины, а также средняя величина натяга Δ_n в сопряжении сердечника со станиной. Кроме того, установлено, что на формирование точностных параметров отверстия статора значительное влияние оказывает также пластическое деформирование сердечника при его взаимодействии с искаженными из-за явления "краевого эффекта" торцами станины. Рассчитаны значения вероятностей возникновения пластических деформаций сердечников, которые увеличиваются с ростом полносности АД и составляют 3 % для АД В, ВРП180\$4 и 16 % для В, ВРП180\$6, 8.

Проведенный анализ патентной и технической литературы показал, что как традиционные, так и новые технологические и конструкторские методы обеспечения точности воздушного зазора либо неэкономичны, либо неэффективны при производстве взрывозащищенных АД. Фактор нестабильности во времени размеров корпусных деталей взрывозащищенных АД не учитывается, вследствие чего операции по снижению остаточных напряжений в этих деталях не применяются.

В результате анализа существующих расчетных методов обеспечения точности воздушного зазора установлено, что к настоящему времени отсутствует обоснованная методика корректировки размеров и допусков деталей, образующих воздушный зазор, поскольку задача поверочного расчета размерной цепи величины воздушного зазора рассматривается как задача плоская. То есть расчет размерной цепи производится для одного произвольно выбранного поперечного сечения АД. В результате поверочный расчет размеров и допусков со-

составляющих звеньев цепи дает неоправданно увеличенные поля допусков и неверные координаты середин полей допусков.

Кроме этого, установлено, что к настоящему времени не разработана теория формирования размерных параметров отверстия статора при взаимодействии сердечника статора со станиной.

Анализ современного состояния проблемы показал, что получение необходимой точности воздушного зазора во взрывозащищенных АД возможно только при комплексном подходе, предусматривающем одновременное совершенствование расчетных, технологических и конструкторских методов обеспечения точности деталей двигателей. Определены задачи исследования.

2. РАЗРАБОТКА РАСЧЕТНЫХ МЕТОДОВ ОБЕСПЛЕЧЕНИЯ ТОЧНОСТИ ВОЗДУШНОГО ЗАЗОРА ВЗРЫВОЗАЩИЩЕННЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Точность корректировки размеров и допусков составляющих звеньев размерной цепи воздушного зазора определяется точностью поверочного расчета его размерной цепи, которая при использовании существующей методики расчета является весьма низкой (глава I). Расположение поперечных сечений АД, в которых действительная величина воздушного зазора имеет минимальное и максимальное значения, для разных типоразмеров АД различно и определяется большим числом постоянно действующих конструктивных и технологических факторов. Это требует подхода к задаче определения действительных значений воздушного зазора как к задаче пространственной.

Под пространственным воздушным зазором (ПВЗ) понимается величина δ_v , определяемая выражением (рис.):

$$\delta_v(z, \alpha) = [z_c(z, \alpha) - z_p(z, \alpha)] \Big| \begin{array}{l} z = [0; L] \\ \alpha = [0^\circ; 360^\circ] \end{array}, \quad (1)$$

где z_c , z_p - текущие радиусы поверхности отверстия статора и наружной поверхности сердечника ротора; z - координата поперечного сечения АД по его оси вращения; α - угол между текущим радиусом статора или ротора и горизонталью; L - длина сердечников статора и ротора.

Статистическими исследованиями установлено, что реальные профили поперечных сечений отверстия статора и наружной поверхности ротора имеют форму овалов с глазными полусиями $C_{c(p)}$ и $B_{c(p)}$, расположенные, соответственно, на горизонтальной X и вертикальной Y осях АД, т.е. $\Psi_{c(p)} = 0^\circ$ (рис.). Поскольку при расчете размерной цепи воздушного зазора определяют лишь его среднее и экст-

ремальные значения, то для угла α принимаем два значения: $\alpha = 0; 90^\circ$. При этом значения текущих радиусов статора и ротора принимают также по два значения: $\sigma_e(z, \alpha) = \sigma_e(z)$, $\delta_e(z)$; $\sigma_p(z, \alpha) = \sigma_p(z)$, $\delta_p(z)$ (рис.).

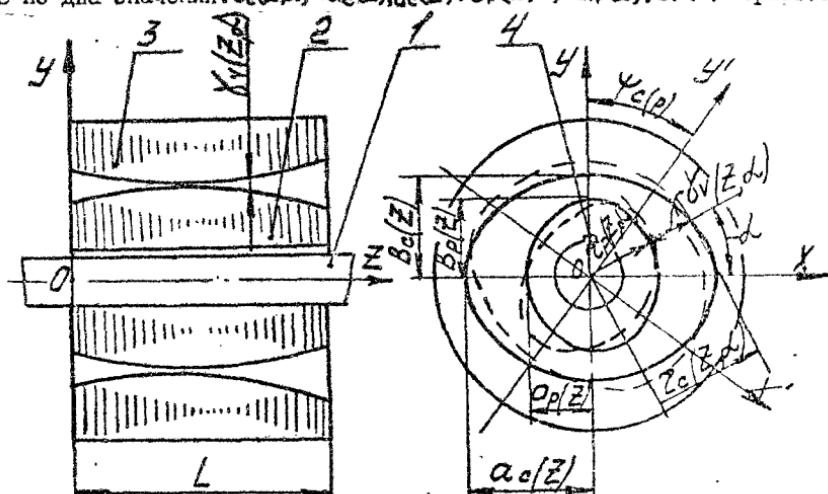


Рис. К определению ПВЗ АД: 1 - вал; 2 - сердечник ротора; 3 - сердечник статора; 4 - шпонка; $\Psi_{e(p)}$ - угол между главной полуосью Y' профиля поперечного сечения отверстия статора (сердечника ротора) и вертикальной осью Y АД.

Тогда из выражения (1) для распределений по оси Z средних $\bar{\delta}_v(z)$, минимальных $\delta_{v\min}(z)$ и максимальных $\delta_{v\max}(z)$ значений ПВЗ в горизонтальном и вертикальном продольных сечениях АД имеем:

$$\left. \begin{aligned} \bar{\delta}_v(z)_1 &= \bar{\sigma}_e(z) - \bar{\sigma}_p(z); & \bar{\delta}_v(z)_2 &= \bar{\sigma}_e(z) - \bar{\delta}_p(z); \\ \bar{\delta}_v(z)_3 &= \bar{\delta}_e(z) - \bar{\sigma}_p(z); & \bar{\delta}_v(z)_4 &= \bar{\delta}_e(z) - \bar{\delta}_p(z) \end{aligned} \right\}; \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} \delta_{v\min}(z)_1 &= \sigma_{e\min}(z) - \sigma_{p\max}(z); \\ \delta_{v\min}(z)_2 &= \sigma_{e\min}(z) - \delta_{p\max}(z); \\ \delta_{v\min}(z)_3 &= \delta_{e\min}(z) - \sigma_{p\max}(z); \\ \delta_{v\min}(z)_4 &= \delta_{e\min}(z) - \delta_{p\max}(z) \end{aligned} \right\}; \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \delta_{v\max}(z)_1 &= \sigma_{e\max}(z) - \sigma_{p\min}(z); \\ \delta_{v\max}(z)_2 &= \sigma_{e\max}(z) - \delta_{p\min}(z); \\ \delta_{v\max}(z)_3 &= \delta_{e\max}(z) - \sigma_{p\min}(z); \\ \delta_{v\max}(z)_4 &= \delta_{e\max}(z) - \delta_{p\min}(z) \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

где $\bar{a}_c(z)$, $\bar{b}_c(z)$ и $\bar{a}_p(z)$, $\bar{b}_p(z)$ - функции распределения по оси Z АД средних статистических значений полуосей статора и ротора; $a_{c\min}(z)$, $b_{c\min}(z)$ и $a_{p\min}(z)$, $b_{p\min}(z)$ - то же для минимальных статистических значений полуосей; $a_{c\max}(z)$, $b_{c\max}(z)$ и $a_{p\max}(z)$, $b_{p\max}(z)$ - то же для максимальных статистических значений полуосей.

Исходя из изложенных положений на основе методов математического анализа разработана методика размерного анализа сопряжения "статор-ротор" АД.

Минимальное $\delta_{v\min}$ и максимальное $\delta_{v\max}$ значения ПВЗ определяются исследованием, соответственно, функций (3) и (4) на экстремум. Минимальным значением ПВЗ является наименьшее из найденных минимальных значений $\min \delta_{v\min}(z)_1, \dots, \min \delta_{v\min}(z)_4$ функций системы (3):

$$\delta_{v\min} = \min \left\{ \min \delta_{v\min}(z)_1, \dots, \min \delta_{v\min}(z)_4 \right\}. \quad (5)$$

Соответственно, максимальным значением ПВЗ является наибольшее из найденных максимальных значений $\max \delta_{v\max}(z)_1, \dots, \max \delta_{v\max}(z)_4$ функций системы (4):

$$\delta_{v\max} = \max \left\{ \max \delta_{v\max}(z)_1, \dots, \max \delta_{v\max}(z)_4 \right\}. \quad (6)$$

Получены выражения для расчета экстремальных значений радиусов и погрешностей формы в поперечных и продольных сечениях отверстия статора и сердечника ротора, а также выражения для расчета средней величины $\bar{\delta}_v$ ПВЗ, средних значений радиусов $\bar{R}_{c(p)}$, некругостей $\bar{P}_{c(p)}$ и погрешностей формы в продольных сечениях $\bar{\Delta}_{c(p)pr}$ поверхностей статора и ротора:

$$\bar{\delta}_v = \frac{1}{\sqrt{L}} \left(\sqrt{\int_0^L \bar{a}_c(z) \bar{b}_c(z) dz} - \sqrt{\int_0^L \bar{a}_p(z) \bar{b}_p(z) dz} \right); \quad (7)$$

$$\bar{R}_{c(p)} = \frac{1}{2L} \left(\int_0^L \bar{a}_{c(p)}(z) dz + \int_0^L \bar{b}_{c(p)}(z) dz \right); \quad (8)$$

$$\bar{P}_{c(p)} = \frac{1}{L} \int_0^L |\bar{a}_{c(p)}(z) - \bar{b}_{c(p)}(z)| dz; \quad (9)$$

$$\bar{\Delta}_{c(p)pr} = \max \left\{ \frac{1}{2} [\bar{a}_{c(p)}(z) + \bar{b}_{c(p)}(z)] \right\} - \min \left\{ \frac{1}{2} [\bar{a}_{c(p)}(z) + \bar{b}_{c(p)}(z)] \right\}. \quad (10)$$

Разработана методика поверочного расчета размерной цепи ПВЗ и корректировки геометрических параметров ее составляющих звеньев

ев. Сравнение точности расчетов по существующей и разработанной методикам показало, что существующая методика дает завышенные на 34–38 %, по сравнению с действительными, значения минимальной величины воздушного зазора. Применение разработанной методики позволило за счет обоснованной корректировки чертежных и настроечных размеров снизить действительные значения относительной НВЗ выпускаемых АД В, ВРП180\$4 на 7,7 %, АД В, ВРП180\$6, З – на 19,8 %.

Для рациональной разработки мероприятий по повышению точности воздушного зазора и правильного назначения конструктивных параметров АД построена математическая модель динамического ПВЗ, отражающая влияние на величину воздушного зазора точностных, конструктивных и эксплуатационных факторов:

$$\delta_{\text{дин}} = \frac{\alpha_c(z) b_c(z)}{\sqrt{b_c^2(z) \sin^2(\varphi - \alpha) + a_c^2(z) \cos^2(\varphi - \alpha)}} - \frac{\alpha_p(z) b_p(z)}{\sqrt{b_p^2(z) \cos^2 \alpha + a_p^2(z) \sin^2 \alpha}} - e_{ct} \cdot \cos \varphi - e_o \cos \sqrt{\frac{48E \cdot I}{\ell^3 m_p \omega^2}} \cdot \varphi, \quad (II)$$

где $\delta_{\text{дин}}$ – величина динамического ПВЗ, мм; φ , z_0 – обобщенные координаты, соответственно, угол поворота ротора, град., и динамический эксцентриситет оси вращения ротора относительно оси статора, мм; α – угол между осью X_p ротора и текущим радиусом точки на поверхности ротора, град.; e_{ct} – величина статического эксцентриситета ротора относительно статора, мм; E – модуль упругости I рода материала вала ротора, кг/мм²; I – момент инерции ротора, мм⁴; ℓ – расстояние между опорами ротора, мм; m_p – масса ротора, кг; ω – частота вращения ротора, 1/с.

С помощью полученной математической модели было проведено исследование динамического ПВЗ АД В, ВРП180\$4 и В, ВРП180\$6 и определены долевые вклады в суммарную погрешность величины воздушного зазора вышенназванных факторов. Установлено, что наибольший долевой вклад (56 %) имеет статический эксцентриситет ротора, далее следуют долевые вклады погрешностей отверстия статора и бочки ротора (35 %) и конструктивно-эксплуатационных факторов (9 %).

Разработана методика расчета допусков на погрешности формы продольных сечений статора и ротора, обеспечивающая совмещение координаты центра группирования средних значений ПВЗ с координатой середины поля допуска и получение поля рассеяния погрешностей зазора в пределах поля допуска. Допуски $\delta_{\text{бр}}$ на бочкообразность пакета ротора и $\delta_{\text{сск}}$ на седлообразность отверстия статора

рассчитывают по формулам:

$$\delta_{p.b} = \frac{\delta_A}{k_b \sqrt{M^2 + 1}}; \quad (12)$$

$$\delta_{e.ca} = M \cdot \delta_{p.b}, \quad (13)$$

где δ_A - допуск на величину воздушного зазора; k_b - коэффициент относительного рассеяния бочкообразности; M - коэффициент, устанавливаемый, с целью обеспечения экономичности обработки, равным отношению допуска на диаметр отверстия статора к допуску на диаметр пакета ротора.

3. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ ТОЧНОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОТВЕРСТИЯ СТАТОРА ПРИ СБОРКЕ СЕРДЕЧНИКА СТАТОРА СО СТАНИНОЙ

Низкая точность параметров воздушного зазора взрывозащищенных АД в значительной степени обусловлена отсутствием научно обоснованного подхода к назначению номинальных размеров и допусков геометрических параметров сборочных единиц статоров, что приводит к фактически произвольному их назначению, "исходя из опыта существующего производства". В результате после сборки сердечника статора со станиной отверстие сердечника имеет погрешности, значительно превышающие допуски. После обработки отверстия статора эти погрешности практически не уменьшаются (глава I). Острая проблема усиливается тем, что обработка отверстия статора взрывозащищенных АД с высотой оси вращения 200 мм и более существующей технологией не предусматривается.

Обоснованное назначение величин рассматриваемых геометрических параметров и их допусков возможно только исходя из математических моделей, отражающих совместное влияние входных геометрических параметров (см. главу I) на погрешности отверстия статора.

Для конечных значений некруглости ρ_e и среднего радиуса \bar{R}_e отверстия пакета после затрещовки в станину получены следующие математические модели:

$$\rho_e = \rho_n + C \left[1 - \frac{1}{K} \right] \left[\Delta_n + \frac{1}{2} (\rho_{pl.n} + \rho_{st}) - \Delta_{n.ca} \right]; \quad (14)$$

$$\bar{R}_e = \bar{R}_n - C \left[1 + \frac{1}{K} \right] \left[\Delta_n + \frac{1}{2} (\rho_{pl.n} + \rho_{st}) + \Delta_{n.ca} \right]; \quad (15)$$

где $\Delta_{n.ca}$ - натяг в сопряжении пакета со станиной по оси в наибольшей величиной давления станины на пакет; C - коэффициент,

характеризующий влияние конструктивных факторов.

$$C = \frac{R_{\text{пп}} (R_{\text{ст.н}}^2 - R_{\text{пн}}^2)}{R_{\text{пп}} (R_{\text{ст.н}}^2 - R_{\text{пп}}^2)},$$

где $R_{\text{пп}}$, $R_{\text{пн}}$, $R_{\text{ст.н}}$ – номинальные радиусы, соответственно, поверхности дна пазов пакета под обмотку, наружной поверхности пакета и отверстия станины.

Анализом полученных математических моделей определены основные закономерности формирования точностных параметров отверстия статора в зависимости от величин натяга и точностных параметров станины и сердечника статора.

С помощью разработанных математических моделей и с использованием статистических данных были рассчитаны долевые вклады входных параметров в величины изменения погрешностей формы ΔR_p и в "усадку" ΔR_n отверстия пакета статора при его запрессовке в станину (табл. I).

Таблица I

Долевые вклады d_i входных параметров в изменение погрешностей формы и в "усадку" отверстия пакета статора, %

Типоразмер двигателя	Долевые вклады входных параметров в ΔR_p			Долевые вклады входных параметров в ΔR_n		
	$d_{\delta n}$	$d_{\rho_{\text{ст}}}$	$d_{\rho_{\text{пп}}}$	$d_{\delta n}$	$d_{\rho_{\text{ст}}}$	$d_{\rho_{\text{пп}}}$
B, BPII80S4	-5,44	86,62	18,82	-5,40	85,92	19,48
B, BPII80M6,8	-2,16	82,10	20,06	-2,16	82,09	20,07

Из полученных результатов (табл. I) следует, что для повышения точности отверстия статора необходимо прежде всего совершенствование конструкции статоров, направленное на уменьшение или полное исключение воздействия станины на сердечник.

На основе построенных математических моделей разработана методика расчета размеров и допусков геометрических параметров сборочных единиц статоров. Допуски δ_{ρ_i} на некруглости поверхностей станины и пакета рассчитываются по формуле:

$$\delta_{\rho_i} = \frac{\sqrt{\delta_{\Delta \rho_p}^2 - \sum_{l=1}^{n-1} \left(\frac{\partial F}{\partial x_l} \right)^2 k_l^2 \omega_l^2}}{\left| \left(\frac{\partial F}{\partial x_l} \right) \right| k_p}, \quad (16)$$

где $\delta_{\Delta \rho_p}$ – допуск на изменение некруглости отверстия пакета; n – число входных параметров; k_l , k_p – коэффициенты относительного рассеяния, соответственно, i – го входного параметра и некруглости;

ω_i - поле рассеяния i -го параметра, $(\frac{\partial F}{\partial x_i})$ - коэффициенты влияния

$$\delta_{\Delta p_n} = \frac{1}{k_p} \sqrt{\delta_{p_c}^2 - k_p^2 \delta_{p_n}^2}, \quad (17)$$

где δ_{p_c} и δ_{p_n} - допуски на некруглость отверстия пакета статора, соответственно, после и до запрессовки пакета в станину.

Допуски на диаметральные размеры сборочных единиц статоров рассчитываются по аналогичным формулам. Требуемая величина диаметра D_n отверстия пакета до запрессовки в станину с учетом "садки" рассчитывается по формуле:

$$D_n = D_c + c \left[1 + \frac{1}{k} \right] \left[\bar{D}_n + \frac{1}{2} (P_{pn} + P_{ct}) + \Delta_{na} \right] - z, \quad (18)$$

где D_c - требуемый диаметр отверстия пакета после запрессовки в станину; z - припуск на обработку отверстия статора.

4. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОВИБРАЦИОННОГО МЕТОДА РАЗМЕРНОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ ВЗРЫВОЗАЩИЩЕННЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Основными задачами при разработке метода являлись: 1) снижение себестоимости операции по снижению остаточных напряжений; 2) выбор режимов обработки, обеспечивающих наименьшее изменение размеров деталей во времени, а также улучшение механических характеристик материала деталей с целью повышения надежности взрывозащиты АД.

Первая задача решена совмещением операции по снижению остаточных напряжений с последней операцией при изготовлении корпусных деталей - операцией гидроиспытания на взрывоустойчивость. Разработанный метод заключается в нагружении изделия во время гидроиспытания циклически переменным внутренним давлением жидкости, что приводит к возникновению в его материале циклически переменных напряжений, действия которых обуславливает снижение остаточных напряжений. С целью наибольшего снижения общей трудоемкости операции разработан валидированный авторским свидетельством способ гидроиспытания станин взрывозащищенных АД, обеспечивающий выполнение гидроиспытания и снижения остаточных напряжений за один технологический переход.

Для решения второй из вышеперечисленных задач в результате теоретических исследований был предложен запатентованный авторским свидетельством режим гидровибробороботки, обеспечивающий наиболее интенсивное и эффективное снижение компоненты растягивающих остаточных напряжений, что обуславливает наибольшее повышение усталост-

ной прочности и стабильности во времени размеров сварных оболочек из малоуглеродистых сталей.

Проведено экспериментальное исследование гидровибрационного метода. Первый этап экспериментальных исследований проводился на образцах типа "сварная тонкостенная оболочка" из малоуглеродистой стали. Получены зависимости влияния величин минимального и максимального давлений жидкости на степень снижения остаточных напряжений, изменение геометрических параметров и параметров нестабильности сварных оболочек. Исследовано также влияние величины и знака остаточных напряжений на стабильность размеров сварных оболочек. Разработаны метод оперативного контроля в условиях действующего производства параметров размерной нестабильности станин взрывозащищенных АД по величинам растягивающих и сжимающих остаточных напряжений в их материале, а также методика выбора режимов гидровиброобработки станин по диаграммам зависимостей параметров размерной нестабильности от режимов гидровиброобработки.

Второй этап экспериментальных исследований проводился на станинах АД ВРП180\$4 и имел целью построение математических моделей процесса гидровиброобработки станин. Основные из полученных математических моделей имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} Z_1 &= 57,756 - 4,965 X_1 - 23,688 X_2 - 7,913 X_1 X_2; \\ Z_2 &= 71,968 + 6,376 X_1 - 3,098 X_2 + 5,937 X_1 X_2; \\ Z_3 &= 91,724 - 12,494 X_2 - 13,184 X_3 - 7,755 X_1 X_2; \\ Z_4 &= (-0,577 + 1,030 X_1 - 0,761 X_2 - 0,903 X_1 X_2) \cdot 10^{-2}; \\ Z_5 &= -13,185 - 6,410 X_2 - 2,880 X_1 X_2. \end{aligned} \right\}, \quad (19)$$

где Z_1 и Z_2 - соответственно, степени снижения растягивающих и сжимающих окружных остаточных напряжений, %; Z_3 - изменение некруглости отверстия станин к моменту времени T после гидровиброобработки, %; Z_4 и Z_5 - средние скорости изменения, соответственно, диаметра и некруглости отверстия станин после гидровиброобработки; X_1 , X_2 - кодированные значения минимального и максимального давлений цикла; X_3 - кодированное значение времени T после гидровиброобработки.

С помощью полученных математических моделей были рассчитаны оптимальные для повышения качественных характеристик станин режимы гидровибропрессования, а также разработаны варианты технологической операции гидроиспытания и гидровиброобработки станин.

Результаты испытания гидровибрационного метода в действую-

ром производстве показали, что за счет повышения стабильности размежон станин метод обеспечивает снижение относительной НВЗ выпускемых АД В, ВРП180~~34~~ на 16,4 %, В, ВРП180~~36~~, 8 - на 28,6 %.

5. РАЗРАБОТКА И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И КОНСТРУКТОРСКИХ МЕТОДОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТОЧНОСТИ И РАВНОМЕРНОСТИ ВОЗДУШНОГО ЗАЗОРА В АИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ, ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ВНЕДРЕНИЯ РАЗРАБОТАННЫХ АЭРОПРИЯТИЙ

Исходя из результатов проведенных статистических и теоретических исследований разработана система технологических и конструкторских методов обеспечения точности параметров воздушного зазора взрывозащищенных АД. Разработанная система защищена семью авторскими свидетельствами и включает в себя следующие методы и устройства.

1. Метод и устройство для устранения явления "краевого эффекта" при дрновании станин, обеспечивающие без увеличения трудоемкости изготовления станин снижение погрешностей отверстия станин на торцах практически до нуля. 2. Технологический процесс изготовления фланцевых станин, позволяющий без дополнительных затрат уменьшить изменение размеров внутренней поверхности станин при проведении сварочных операций в 2-3 раза, при этом снизить его на торцах до нуля. 3. Метод обработки отверстия статора дрнованием через технологическую втулку с одновременным калиброванием пазов сердечника статора, исключающий возможность "разбивки" и возникновения погрешностей формы отверстия статора и обеспечивающий получение требуемой точности (8-9 квалитеты) и шероховатости ($R_a = 0,32$) его поверхности. 4. Метод сборки сердечника статора со станиной осевым обкатием кольцевой выгибки листов сердечника, исключающий возникновение погрешностей отверстия сердечника статора из-за его взаимодействия с торцевыми участками станины. 5. Метод запрессовки сердечника статора в станину с опережающим дрнованием ее отверстия, позволяющий снизить на 32-36 % погрешности отверстия сердечника за счет уменьшения воздействия на сердечник деформаций станины, обусловленных релаксацией остаточных напряжений. 6. Конструкцию бескорпусного взрывозащищенного АД, имеющую величину относительной НВЗ на 54,1 % ниже, чем у аналогов, и позволяющую снизить трудоемкость сварочных операций при изготовлении АД на 26,7 %. 7. Конструкцию взрывозащищенного АД с повышенной точностью взрывозащитных зазоров и величиной относительной НВЗ, на 27,4 % более низкой по сравнению с базовыми двигателями.

Оценка результатов внедрения в производство в НПО "Кузбасс-электромотор" разработанных мероприятий показала, что они позволили существенно повысить точность величины воздушного зазора и обеспечили получение значений ε_b относительной НВЗ, значительно более низких, чем значения ε_b НВЗ при базовой технологии изготовления, и не превышающих допустимые $\varepsilon_{\text{спн}}$ значения для аналогичных типоразмеров АД общепромышленных серий (табл. 2).

Таблица 2

Изменение минимальной величины воздушного зазора $\Delta \delta_{\min}$, относительной НВЗ $\Delta \varepsilon$ и достигнутые значения ε_b относительной НВЗ АД после внедрения разработанных мероприятий, %

Типоразмер двигателя	$\Delta \delta_{\min}$	ε_b	ε_b	$\Delta \varepsilon$	$\varepsilon_{\text{спн}}$
В, ВРП160S4	10,68	46,04	28,54	-19,50	28,84
В, ВРП180M6, 8	33,07	77,12	39,87	-37,25	40,54

Результаты расчетов по полученным величинам относительной НВЗ значений выходных энергетических характеристик АД свидетельствуют об улучшении всех выходных энергетических параметров двигателей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате статистико-корреляционных исследований определены основные закономерности формирования точностных параметров и параметров напряженно-деформированного состояния деталей и сборочных единиц взрывозащищенных АД в ходе производства. Выявленные закономерности позволяют обоснованно определять направления совершенствования технологии изготовления АД для обеспечения необходимой точности их параметров воздушного зазора.

2. Разработана методика размерного анализа сопряжения "статор-ротор" АД. Разработанная на ее основе методика поверочного расчета размерной цепи ПВЗ обеспечивает повышение точности определения величины воздушного зазора у выпускаемых АД на 34-38 %. Это позволяет за счет обоснованной корректировки чертежных и настроечных размеров снизить НВЗ АД на 7,7-19,8 %.

3. Создана математическая модель динамического ПВЗ АД, учитывающая все основные конструктивные, точностные и эксплуатационные показатели АД, определяющие величину ПВЗ. Модель обеспечивает обоснованное управление точностью ПВЗ на стадиях проектирования и изготовления АД.

4. Разработана методика расчета допусков на погрешности

формы продольных сечений статора и ротора, обеспечивающая получение поля рассеяния погрешностей воздушного зазора в пределах поля допуска.

5. Построены математические модели и выявлены основные физические закономерности формирования точностных параметров отверстия статора. Разработана методика расчета размеров и допусков геометрических параметров сборочных единиц статоров, обеспечивающая получение точностных параметров отверстия в пределах заданных допусков.

6. Разработан, теоретически обоснован и экспериментально исследован гидровибрационный метод размерной стабилизации корпусных деталей взрывозащищенных АД. Построены математические модели процесса гидровиброобработки станин, позволившие рассчитать оптимальные параметры процесса и разработать технологические варианты промышленного использования метода при серийном производстве станин взрывозащищенных АД. Снижение относительной НВЗ взрывозащищенных АД, достигнутое благодаря повышению точности и стабильности размеров станин в результате гидровиброобработки, составляет 16,4–28,6 %.

7. Экспериментальным исследованием определены основные закономерности влияния величины и знака остаточных напряжений на показатели размерной нестабильности сварных оболочек из малоуглеродистых сталей. Предложен экономичный метод контроля параметров размерной нестабильности станин взрывозащищенных АД по величинам остаточных напряжений, позволяющий оперативно производить выбор и корректировку режимов гидровиброобработки станин в условиях действующего производства.

8. На основании выявленных закономерностей формирования точностных показателей воздушного зазора разработана система технологических и конструкторских методов обеспечения необходимой точности важнейших геометрических параметров взрывозащищенных АД.

ЛУБЛИКАЦИИ

1. Всяких А.А., Манохин Ю.И., Сорокин А.В. Статистическое исследование технологического процесса изготовления статоров взрывозащищенных электродвигателей/НИИ НО "Кузбассэлектромотор".- Кемерово, 1987.-15 с.-Деп. в Информэлектро 15.12.87, № 962-3787.

2. Манохин Ю.И., Сорокин А.В., Всяких А.А. Оценка влияния циклического нагружения внутренним давлением на точность формы сварных полых цилиндров//Сварочное производство.-1987.-№ 12-с.14.

3. Манохин Ю.И., Сорокин А.В. Близкое гидровибрационной об-

работки тонкостенных оболочек на напряженно-деформированное состояние//Проблемы прочности.-1990.-№ 6.-с. 98-101.

4. Сорокин А.В., Манохин Ю.И. Исследование влияния технологических операций изготовления на напряженно-деформированное состояние сварных станин взрывозащищенных электродвигателей/НИИ НПО "Кузбассэлектромотор".-Кемерово, 1989.-28 с.-Деп. в Информэлектро 14.03.89. № 88-ЭТ89.

5. Сорокин А.В., Манохин Ю.И. Определение объемного воздушного зазора асинхронных двигателей с помощью методов математического анализа//Электротехника.-1990.-№ 9.-с. 37-41.

6. Сорокин А.В. Влияние погрешностей формы в продольном сечении статора и ротора на воздушный зазор асинхронных двигателей// Электротехника.-1991.-№ 5.-с. 33-36.

7. Сорокин А.В. Исследование процесса сборки сердечника статора со станиной электродвигателя//Тр. НИИ НПО "Кузбассэлектромотор".-Кемерово, 1991.-Вып. 14.-с. 135-141.

8. Сорокин А.В., Манохин Ю.И. Разработка теории объемного воздушного зазора асинхронных двигателей и методики расчета его размерной цепи//Интеллектуальные электродвигатели и экономия электроэнергии:Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф.-Владимир, 1991.-с. 82-83.

9. Сорокин А.В., Манохин Ю.И. Разработка теории упругого взаимодействия и методики расчета точностных параметров сердечника статора и станины асинхронного двигателя при наличии погрешностей формы их поверхностей//Электромеханические преобразователи и машино-вентильные системы:Тез. докл. Респ. науч.-техн. конф.-Томск, 1991.-с. 72.

10. Сорокин А.В., Манохин Ю.И. Статистическая оценка влияния нестабильности размеров корпусных деталей взрывозащищенных электродвигателей на неравномерность воздушного зазора//Тр. НИИ НПО "Кузбассэлектромотор".-Кемерово, 1991.-Вып. 14.-с. 127-135.

11. Сорокин А.В. Математические модели технологического процесса сборки сердечника статора со станиной электродвигателя// Электротехника.-1991.-№ 4.-с. 9-13.

12. А.с. 1361184 СССР. Способ снижения остаточных напряжений в сварных оболочках/Всяких М.А., Манохин Ю.И., Сорокин А.В.и пр// Открытия. Изобретения.-1987.-№ 47.

13. А.с. 1429230 СССР. Взрывозащищенная электрическая машина/ Сорокин А.В.///Открытия. Изобретения.-1988.-№ 37.

14. А.с. 1534643 СССР. Способ изготовления статора электриче-

ской машины/Сорокин А.В.//Открытия. Изобретения.-1990,-№ 1.

15. А.с. I60349I СССР. Способ изготовления статора электрической машины и устройство для его осуществления/Сорокин А.В., Манохин Ю.И., Всяких М.А.//Открытия. Изобретения.-1990.-№ 40.

16. А.с. I723628 СССР. Статор электродвигателя/Сорокин А.В.//Открытия. Изобретения.-1992.-№ 12.

Н.Сорокин

Подписано к печати 13.11.92. Формат 60Х90 1/16. Печ. л. 1,25.
Уч.-изд. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ 244/645.

УОП ЧГТУ. 454080. Челябинск, пр. им. В.И.Ленина, 76.