

ТАРАСОВА НАТАЛЬЯ АЛЕКСАНДРОВНА

**КОНТРОЛЬ ВИБРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ
ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА
С МИНИМИЗАЦИЕЙ ПОГРЕШНОСТЕЙ**

05.11.13 – Приборы и методы контроля
природной среды, веществ, материалов и изделий

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Работа выполнена на кафедре «Теоретические основы электротехники»
Казанского государственного энергетического университета

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор **Баширов Заур Ахматуллович**

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор **Белавин Владимир Алексеевич**

кандидат технических наук,
доцент **Валиуллин Рафиль Равильевич**

Ведущая организация: Казанский государственный
технический университет им. А.Н. Туполева

Защита состоится 19 февраля 2003г. в 14 часов 30 минут на заседании
диссертационного совета Д212.082.01 при Казанском государственном
энергетическом университете (420066, г.Казань, ул.Красносельская, 51)

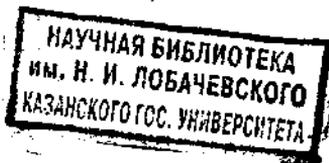
С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Казанского
государственного энергетического университета.

Автореферат разослан " 15 " февраля 2003г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Володин А.Г.



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Асинхронный двигатель является основным потребителем электроэнергии большинства предприятий. Широкое применение асинхронных двигателей объясняется их высокими эксплуатационными и технико-экономическими характеристиками. Поэтому даже незначительный процент отказа асинхронных двигателей приводит к тяжелым последствиям для предприятий, что обуславливает значительное внимание к техническому состоянию этих двигателей.

Одним из перспективных методов **оценивания** технического состояния асинхронных двигателей является метод вибродиагностики. В основе этого метода лежит измерение параметров и характеристик вибрации, генерируемых **асинхронным** двигателем; сравнение по определенным критериям экспериментальных оценок параметров и характеристик вибрации с заданными; принятие решения о техническом состоянии. Качество вибродиагностики во многом определяется достоверностью оценок параметров вибрации на этапе измерения.

Известные методы и средства **контроля** и измерения характеристик и параметров вибрации, основанные на спектральном **анализе** виброакустических процессов, позволяют получать достоверные **оценки** только в том случае, когда в качестве модели исследуемых сигналов используется детерминированный или стационарный эргодический процесс. Виброакустические процессы асинхронных двигателей носят сложный характер, представляют собой совокупность периодических и случайных нестационарных процессов и связаны с режимом работы. Кроме того, применение экспериментальных методов для контроля и измерения спектральных характеристик виброакустических процессов сдерживается зависимостью точности получаемых оценок от вида измеряемого спектра, от соотношения периода нестационарности процесса и времени анализа, от соотношения частотных полос измеряемых процессов и средств **спектрального** анализа. Это не позволяет получать спектральные оценки виброакустических процессов с заданной точностью измерения. Поэтому возникает актуальная задача оценки спектральных характеристик виброакустических процессов асинхронных двигателей с заданной точностью.

Цель работы заключается в повышении точности контроля спектральных характеристик вибрации асинхронных двигателей на основе **применения** экспериментально-расчетных методов анализа виброакустических процессов и минимизации методических погрешностей.

Для достижения этой цели в диссертации решена задача разработки экспериментально-расчетных методов и систем **оценивания** спектральных характеристик виброакустических процессов электрических машин с требуемой точностью измерения.

Частными задачами диссертационной работы являются:

- анализ и классификация погрешностей систем оценивания спектральных характеристик виброакустических процессов с учетом специфики режимов работы асинхронных двигателей;
- разработка экспериментально-расчетных методов и систем оценивания спектральных характеристик виброакустических процессов асинхронных двигателей на основе согласования вида анализируемого спектра с параметрами систем анализа;
- исследование зависимости пульсирующих магнитных сил в зазоре электрических машин для системы преобразователь частоты -- асинхронный двигатель от ее характеристик и разработка на этой основе модели вибрации асинхронного двигателя;
- разработка методики проектирования систем контроля вибрации асинхронных двигателей на основе критерия «погрешность - стоимость»;
- разработка системы измерения спектральных характеристик вибрации асинхронных двигателей.

Методы исследований. Для решения поставленных задач систематизированы и обобщены знания в области виброакустических исследований электрических машин и аппаратурного спектрального анализа случайных и детерминированных процессов.

Теоретические исследования базируются на современных методах теории вероятности, теории случайных процессов, математической статистики, спектрального анализа стационарных и нестационарных случайных процессов.

Экспериментальные результаты получены при использовании современного виброакустического измерительного оборудования.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработан новый метод контроля спектральных характеристик широкополосной вибрации электрических машин на основе оценивания текущих статистических характеристик. Показано, что для уменьшения зависимости точности оценки спектральной характеристики от вида анализируемого спектра и получения оценки с заданной точностью необходимо определять время усреднения в каждой частотной полосе анализа по результатам измерения текущей случайной погрешности.
2. Предложена новая метрологическая характеристика систем контроля вибрации, которая связывает спектральные характеристики исследуемых процессов с параметрами систем контроля и позволяет оценить качество различных методов спектрального анализа.
3. Проведены исследования зависимости пульсирующих магнитных сил в зазоре электрической машины для системы преобразователь частоты - асинхронный двигатель (ПЧ-АД) от ее характеристик. Установлено, что

пульсации электромагнитного момента определяются схемой работы вентилей ПЧ и качеством сглаживания выпрямленного напряжения.

4. Разработан метод оптимизации параметров систем контроля, минимизирующий суммарную методическую погрешность средств измерения спектральных характеристик вибрации.

Практическая ценность работы.

1. Разработана методика проектирования систем контроля вибрации асинхронных двигателей на основе критерия «погрешность - стоимость».

2. Разработана система контроля параметров и статистических характеристик вибрации электрических машин.

Реализация результатов работы. Теоретические и практические результаты диссертации используются в учебном процессе на кафедре теоретических основ электротехники Казанского государственного энергетического университета, на кафедре электропривода и электротехники Казанского государственного технологического университета при подготовке специалистов по направлению «Электротехника, электромеханика и электротехнология».

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы обсуждались на Российском национальном симпозиуме по энергетике, Казань, 2001, Всероссийской научно-технической конференции «Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике», Чебоксары, 2000, республиканской научной конференции «Проблемы энергетике», Казань, 1997, 16-й Военно-технической конференции «Вопросы совершенствования боевого применения и разработок артиллерийского вооружения и ракетной техники», Казань, 1999, 14-й Всероссийской межвузовской научно-технической конференции «Внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика, диагностика, экология», Казань, 2002.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников литературы из 112 наименований и приложений. Она изложена на 117 страницах, содержит 20 рисунков.

Научные положения, выносимые на защиту На основе полученных в диссертационной работе результатов на защиту выносятся следующие научные положения:

1. Метод спектрального анализа широкополосной вибрации асинхронных двигателей на основе оценивания текущих статистических характеристик.

2. Метрологическая характеристика систем контроля спектральных характеристик вибрации, основанная на учете вида частотных характеристик анализируемых каналов и вида исследуемого спектра.

3. Зависимость пульсирующих магнитных сил в зазоре электрической машины для системы ПЧ-АД от ее характеристик.

4. Метод оптимизации параметров систем контроля, минимизирующий

суммарную методическую погрешность средств измерения спектральных характеристик вибрации.

5. Методика проектирования систем контроля вибрации асинхронных двигателей на основе критерия «погрешность – стоимость».

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность задачи повышения точности контроля спектральных характеристик вибрации асинхронных двигателей на основе применения экспериментально-расчетных методов анализа виброакустических процессов и оптимизации параметров систем контроля, сформулированы цель и задачи диссертационной работы. Приведены структура диссертации и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены виброакустические процессы, генерируемые асинхронными двигателями, методы и системы определения их технического состояния по результатам контроля параметров вибрации и шума асинхронных двигателей, а также методические погрешности измерения спектральных характеристик виброакустических процессов. Вибрация и шум относятся к важнейшим показателям, характеризующим качество электрических машин, поэтому измерению их спектральных характеристик и параметров уделяется значительное внимание. Создание систем контроля вибрации электрических машин определяется ростом:

- количества точек контроля и, соответственно, датчиков;
- сложности анализа исследуемых процессов;
- сложности алгоритмов обработки;
- мощности вычислительных систем;
- объема информации для экспертов.

Исследование источников вибрации вращающихся электрических машин позволило разработать модели виброакустических процессов с учетом существующих и перспективных цифровых и аналоговых средств измерения. Особое внимание уделено описанию виброакустических процессов в частотной области на основе применения аппарата преобразования Фурье.

Показано, что при исследовании асинхронных двигателей целесообразно использовать наряду с простейшими моделями виброакустических процессов, основанных на детерминированных колебаниях (гармонические и полигармонические), более сложные модели в виде смеси детерминированных и случайных колебаний.

Проведенный анализ методов и систем спектрального анализа виброакустических процессов электрических машин, а также рассмотренные частотные модели этих процессов и погрешности анализа позволяют сделать вывод о том, что, несмотря на хорошо развитый теоретический и экспериментальный аппарат спектрального анализа, качество получаемых оценок во многих случаях не удовлетворяет современным требованиям экспериментальных исследований. В связи с

этим при решении задач анализа спектральных характеристик вибрации электрических машин перед разработчиками стоит задача повышения качества анализа спектральных характеристик. При этом под повышением качества понимается задача уменьшения погрешности анализа и, в первую очередь, уменьшения методических погрешностей.

Проведенные исследования виброакустических процессов асинхронных двигателей, анализ источников вибрации, а также анализ методов получения спектральных характеристик с учетом многообразия моделей позволяют сформулировать задачу измерения вибрации асинхронных двигателей в следующем виде.

Требуется разработать метод спектрального анализа R , структуру системы S и выбрать параметры Π , которые обеспечивают

$$\min_{\{R, S, \Pi\}} \Delta G \text{ при } K_n \in \{K_n^d\} \quad (1)$$

для заданного множества классов спектров D .

Здесь $\{K_n^d\}$ - множество допустимых показателей качества из разряда ограничений; ΔG - погрешность спектрального анализа. Класс спектров D определяется характеристиками и параметрами исследуемых виброакустических процессов (динамический ΔD и частотный ΔF диапазоны, число всплесков N_v и провалов N_n в анализируемом спектре, длительность T_p реализации виброакустического процесса и т.д.).

При проектировании систем спектрального анализа погрешность анализа определяется как

$$\Delta G = \left\| \hat{G}(\omega) - \tilde{G}(\omega) \right\|, \quad (2)$$

где $G(\omega)$ и $\hat{G}(\omega)$ - соответственно энергетический спектр из заданного класса спектров D и его оценка.

Оценка погрешности анализа по (2) является задачей достаточно трудной из-за того, что вид функции $G(\omega)$ часто бывает неизвестен. В связи с этим целесообразно использовать для оценки погрешности параметры виброакустических процессов, определяющих класс спектров D . В этом случае задачу проектирования систем спектрального анализа можно сформулировать в виде следующих неравенств:

$$\sum_{i=1}^n B_i + \sum_{j=1}^m \Pi_j \leq \sum_{k=1}^l \Phi_k, \text{ где } l \geq n + m, \quad (3)$$

$$\Delta f_{i, j \min} \gg \Delta f_{\phi \min}; \quad (4)$$

$$\Delta D_c < \Delta D_a; \quad (5)$$

$$\Delta F_c \leq \Delta F_a; \quad (6)$$

$$T_p > T_a, \quad (7)$$

где В, П, Ф -соответственно всплеск, провал и анализирующий фильтр; $\Delta f_{i \min}$ – минимальная частотная полоса всплеска или провала в анализируемом спектре; $\Delta f_{\phi \min}$ - минимальная частотная полоса анализирующего фильтра; ΔD_c и ΔD_a соответственно динамический диапазон сигнала и анализатора; Δf_c и Δf_a - соответственно частотный диапазон сигнала и анализатора; T_p , T_a - соответственно длительность реализации и время анализа.

Во второй главе проведен анализ электромагнитных процессов в системе ПЧ-АД на основе математического моделирования с помощью теории обобщенных функций (ТОФ).

Современный регулируемый электропривод питается от преобразователей частоты, которые дополнительными источниками вибрации. Одна из распространенных схем питания асинхронного двигателя от преобразователя частоты представлена на рис.1.

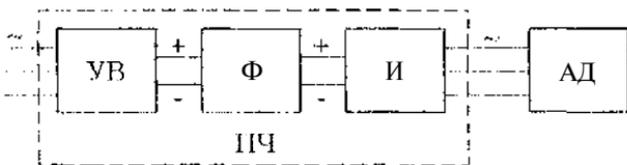


Рис.1. Структурная схема системы ПЧ-АД

Управляемый выпрямитель (УВ) задает необходимое соотношение напряжения и частоты выходного напряжения преобразователя, фильтр (Ф) сглаживает выходное напряжение выпрямителя, а инвертор (И) преобразует его в выходное переменное многофазное напряжение.

При наличии хорошего фильтра основным источником пульсирующего электромагнитного момента в этой схеме будет инвертор. В дальнейшем анализе предполагается, что напряженке на выходе фильтра идеально сглажено.

Одним из основных принципов линеаризации математической модели ПЧ является представление его силовых вентилях в виде идеальных коммутаторов, которые способны находиться в двух устойчивых состояниях • • «включено» и «отключено», переход из одного состояния в другое происходит мгновенно. Основным параметром идеального коммутатора является его переключающая функция (ПФ) $h_i(t)$. В общем случае ПФ цепи с периодически изменяющимися параметрами для m -го интервала работы вентиля можно записать

$$h_m(t) = \sum_{n=0}^k \{1[t - (n + \Theta_m)T] - 1[t - (n + \Theta_m + \Delta_m)T]\}, \quad (8)$$

где периодические функции включения и выключения m -го интервала

работы вентиля записаны в виде временных рядов $\sum_{n=0}^k \mathbf{1}[t - (n + \Theta_m)T]$ и

$\sum_{n=0}^k \mathbf{1}[t - (n + \Theta_m + \Delta_m)T]$; номер рассматриваемого периода n определяется

как целая часть отношения текущей координаты t к периоду повторяемости процесса T ; Θ_m и Δ_m – безразмерные коэффициенты, характеризующие момент начала и длительность m -го интервала работы вентиля.

Исследуемая схема системы ПЧ-АД представлена на рис.2.

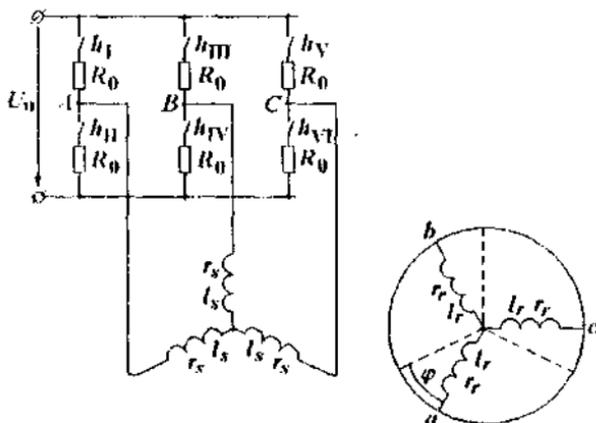


Рис.2. Схема силовой части системы ПЧ-АД

Согласно общей теории электрических машин уравнения электрического равновесия трехфазных АД для мгновенных значений непрерывных функций в матричной форме имеют вид

$$\begin{pmatrix} \mathbf{U}_{abc}^s \\ \mathbf{U}_{abc}^r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{R}_{abc}^s + p\mathbf{L}_{abc}^s & p\mathbf{L}_{abc}^{sr} \\ p\mathbf{L}_{abc}^{rs} & \mathbf{R}_{abc}^r + p\mathbf{L}_{abc}^r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{I}_{abc}^s \\ \mathbf{I}_{abc}^r \end{pmatrix} \quad (9)$$

где $\mathbf{R}_{abc}^{s,r}$, $\mathbf{L}_{abc}^{s,r}$, $\mathbf{L}_{abc}^{sr,rs}$ – квадратные матрицы параметров машины, $\mathbf{U}_{abc}^{s,r}$, $\mathbf{I}_{abc}^{s,r}$ – матрицы-столбцы фазных напряжений и токов.

При переходе к записи обобщенных функций матрица фазных напряжений $\mathbf{U}_{abc}^{s,r}$ умножается на матрицу ПФ фазы $\mathbf{H}_{abc}^s = \text{diag}(h_a, h_b, h_c)$:

$$\mathbf{U}_{abc}^s = \mathbf{H}_{abc}^s \mathbf{U}_{abc}^s = \begin{pmatrix} h_a & 0 & 0 \\ 0 & h_b & 0 \\ 0 & 0 & h_c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_a^s \\ u_b^s \\ u_c^s \end{pmatrix} \quad (10)$$

ПФ фазы можно представить в виде суммы ПФ интервалов, в которых структура системы ПЧ-АД остается неизменной. Выразив на каждом интервале величину фазного напряжения АД через величину напряжения питания U_n , получим

$$\vec{U}_{abc}^s \begin{vmatrix} h'_a & 0 & 0 \\ 0 & h'_b & 0 \\ 0 & 0 & h'_c \end{vmatrix} \cdot U_n \quad (11)$$

где ПФ h'_a, h'_b, h'_c представляют собой линейные комбинации ПФ интервалов постоянства структуры (ИПС), вид которых зависит от схемы преобразователя, величины угла управления вентилями и коэффициента мощности системы.

Применение обобщенных функций позволяет ввести в уравнения граничные условия в виде импульсных составляющих фазных напряжений.

При исследовании процессов в системе ПЧ-АД применено комплексное вращающееся преобразование к осям прямой, обратной и нулевой последовательностей для статора и ротора, которое позволяет свести матричное уравнение (9) с переменными коэффициентами к трем независимым системам уравнений второго порядка с постоянными коэффициентами. Кроме того, системы уравнений прямой и обратной последовательностей являются комплексно сопряженными, что позволяет решать только одну систему уравнений. Особенностью этих уравнений, записанных относительно мгновенных значений переменных, является то, что в зависимости от закона управления вентилями будут изменяться только возмущающие функции при неизменных параметрах.

Решение системы уравнений прямой последовательности проведено в алгебре со сверткой. Полученные выражения для токов статора и ротора на ИПС имеют вид:

$$\vec{i}_1^{s,r}(t) = h_m(t) \left\{ k_1^{s,r} \frac{u_m^s}{r_s} \left(1 - e^{p_1 [t - (n + \Theta_m)] t'} \right) + J_{0m}^{s,r} e^{p_1 [t - (n + \Theta_m)] t'} + \frac{1}{2} \left(k_2^{s,r} \frac{u_m^s}{r_s} + k_3^{s,r} J_{0m}^s + k_4^{s,r} J_{0m}^r \right) \left(e^{p_1 [t - (n + \Theta_m)] t'} - e^{p_2 [t - (n + \Theta_m)] t'} \right) \right\} \quad (12)$$

Уравнении (12) u_m^s — величина напряжения прямой последовательности на рассматриваемом ИПС; J_{0m}^s и J_{0m}^r — значения токов прямой последовательности статора и ротора в начале интервала; $k_1^{s,r} - k_4^{s,r}$ — постоянные коэффициенты; p_1 и p_2 — корни характеристического уравнения

$$(l_1^s l_1^r - l^2) p^2 + [r_s l_1^r + r_r l_1^s + j \omega (l_1^s l_1^r - l^2)] p + r_s (r_r - j \omega l_1^r) = 0 \quad (13)$$

В этом уравнении r_s и r_r — активные сопротивления обмоток статора и ротора; L_s и L_r — индуктивности, характеризующие поля статора и ротора, ω — электрическая угловая частота вращения ротора.

Электромагнитный момент можно записать в виде

$$\overline{M}_{эм}(t) = jnI \left(\overset{*}{i}_1^* \overset{*}{i}_1' - \overset{*}{i}_1' \overset{*}{i}_1^* \right) \quad (14)$$

где n — число пар полюсов АД.

Дальнейшее исследование электромагнитных процессов проводилось на ЭВМ.

Третья глава посвящена повышению качества оценивания спектральных характеристик виброакустических процессов электрических машин.

Рассматриваются погрешности систем анализа спектральных характеристик виброакустических процессов асинхронных двигателей, и дается их классификация с учетом метрологических свойств систем измерения и анализа. Исследуются погрешности, обусловленные неидеальностью операторов преобразования, лежащих в основе определения спектра, и усреднения, а также ограниченным объемом используемых выборочных данных о мгновенных значениях случайного процесса.

Для метода спектрального анализа, основанного на разложении спектра по системе базисных функций в обобщенный ряд Фурье, определен оптимальный коэффициент разложения из условия минимума среднеквадратической погрешности:

$$d(\Delta \hat{G}^2(\omega)) / d\hat{G}(\omega_k) = 0, \quad k \in \{k\}_0^M, \quad (15)$$

$$\text{где } \Delta \hat{G}^2(\omega) = \Delta \omega_k^{-1} \int_{\Delta \omega_k} \left[\hat{G}(\omega) - \sum_{k=0}^M \hat{G}(\omega_k) B(\omega_k, \omega) \right]^2 d\omega. \quad (16)$$

Здесь $B(\omega_k, \omega)$ — базисные неортогональные функции; $\Delta \omega_k$ — частотная полоса, на которой определен спектр $\hat{G}(\omega_k)$.

При этом коэффициент разложения $\hat{G}(\omega_k)$ определится как

$$\begin{aligned} \hat{G}(\omega_k) = & (P_B \Delta \omega)^{-1} \int_{\Delta \omega_k} \hat{G}(\omega) B(\omega_k, \omega) d\omega - \\ & - \sum_{i=0}^M \hat{G}(\omega_i) / 2P_B \Delta \omega_k \int_{\Delta \omega_k} B(\omega_k, \omega) B(\omega_i, \omega) d\omega, \end{aligned} \quad (17)$$

где $P = \Delta \omega^{-1} \int_{\Delta \omega_k} \hat{G}^2(\omega) d\omega$.

При определении множества коэффициентов разложения $\{G_k\}_0^M$ необходимо решать систему уравнений вида (17).

Для уменьшения зависимости оценки анализируемого спектра от вида исследуемого спектра предлагается метод анализа, основанный на управлении временем усреднения в каждой частотной полосе анализа. Выбор необходимого времени усреднения определяется экспериментально по результатам оценки текущей статистической погрешности. Контроль за текущей погрешностью осуществляют через оценку разности

$$\Delta G(\omega)_{j,j+1} = G_{j+1}(\omega) - \hat{G}_j(\omega), \quad (18)$$

где $\hat{G}_j(\omega)$ и $\hat{G}_{j+1}(\omega)$ - соответственно оценки коэффициентов разложения на j -м и $(j+1)$ -м отсчетах. При выполнении неравенства $|\Delta G(\omega)_{j,j+1}| < \delta$, где δ - уровень, выбираемый из соображения требуемой точности спектрального анализа, регистрируется серия заданной длины S , при которой $|\Delta G(\omega)_{j,j+1}|$ станет устойчиво меньше δ .

Рассмотрены свойства оценок спектра $\hat{G}(\omega)$ для идеальных операторов преобразования $q[x(t)]$ и усреднения C_d :

$$C_d[x(t)] = I[x(t)] = C_d\{q[x(t)]\}, \quad (19)$$

где $d = NVTVNT$ - параметр, характеризующий объем используемых выборочных данных о мгновенных значениях случайного процесса $x(t)$.

Исследованы связи свойств оценок спектра $\hat{G}(\omega)$ со свойствами оценок коэффициентов разложения $\{\hat{G}(\omega_k)\}$ на требования несмещенности, состоятельности и эффективности. Установлено, что несмещенность и состоятельность оценок $\{\hat{G}(\omega_k)\}_0^M$ не приводит к несмещенности и состоятельности оценки спектра $\hat{G}(\omega)$ из-за конечности числа членов суммы.

При технической реализации невозможно получить систему базисных ортогональных функций. Поэтому погрешность аппроксимации (16) будет зависеть не только от числа членов разложения, но и от степени ортогональности базисных функций. Получено условие наблюдаемости спектра $G(\omega)$ на входе спектроанализатора, реализующего метод разложения по системе базисных функций, в виде неравенства

$$\int_{\Delta\omega_k} C(\omega)B(\omega_k, \omega)d\omega \geq \frac{1}{2} \sum_{l=0}^M G(\omega_l) \int_{\Delta\omega_k} B(\omega_k, \omega)B(\omega_l, \omega)d\omega. \quad (20)$$

Условие (20) показывает возможность оценки малого уровня спектральных составляющих в некоторой k -й частотной полосе анализа

при наличии значительных спектральных составляющих в соседних частотных полосах анализа.

В этом случае целесообразно ввести характеристику вида

$$\gamma = \frac{A - B}{A}, \quad (21)$$

$$\text{где } A = \int_{\Delta\omega_k} G(\omega)B(\omega_k, \omega)d\omega; \quad B = \sum_{l=0}^M \int_{\Delta\omega_k} B(\omega_k, \omega)B(\omega_l, \omega)d\omega,$$

которая позволяет оценивать качество различных методов спектрального анализа.

Четвертая глава посвящена анализу показателей качества систем контроля вибрации асинхронных двигателей и разработке методики проектирования систем контроля вибрации асинхронных двигателей на основе критерия «погрешность - стоимость».

Для системы контроля вибрации асинхронных двигателей из всей совокупности показателей качества выбраны два основных: погрешность $\Delta G(\omega)$ измерения спектральных характеристик и затраты Z . При этом погрешность измерения определяется как некоторое расстояние с метрикой вида

$$\Delta G(\omega) = \rho[G(\omega) - \hat{G}(\omega)],$$

где ρ - оператор различия.

Оператор различия может быть выбран исходя из различных критериев. Наибольшее распространение получил среднеквадратический критерий оценки погрешности, интегрально учитывающий погрешность в полосе $\Delta\omega$

$$\rho(G(\omega), \hat{G}(\omega)) = \frac{1}{\Delta\omega} \int_0^{\Delta\omega} |G(\omega) - \hat{G}(\omega)|^2 d\omega \quad (22)$$

В условиях априорной недостаточности сведений о спектрах виброакустических процессов для оценки качества систем измерения спектра следует воспользоваться метрологическими характеристиками и параметрами, отражающими потенциальные возможности средств измерения.

При большом числе вариантов построения систем возникает задача выбора наилучшего варианта. Для решения указанной задачи целесообразно использовать метод стоимостных характеристик, анализ которых позволяет уже на начальном этапе синтеза исключить неперспективные решения. Неперспективным вариантом является некая система, если существует другая одноименная система, показатели качества которой выше соответствующих показателей первой системы, а стоимость ниже.

Для построения стоимостных характеристик разработана морфологическая структура систем виброакустической диагностики электрических машин в виде иерархического графа входимости $\Gamma = (И, С)$, ото-

бражающего порядок вхождения отдельных элементов и подсистем в систему.

Морфологическая структура систем виброакустической диагностики имеет пирамидальное построение в виде древовидного графа и отображает свойства подчиненности подсистем. При этом система виброакустической диагностики, как некоторое **целое**, обозначается в виде корневой вершины графа - узла нулевого уровня B_0 . Последующие узлы: первый B_1 , второй B_2 и т.д. -- отображают множество вариантов построения отдельных подсистем и позволяют синтезировать любые подсистемы, расположенные на предыдущих, более высоких уровнях графа. Построение графа заканчивается при достижении уровня элементов по всем ветвям. Ребра С графа входимости идентифицируют направление функциональных связей между подсистемами. Из графа входимости следует, что стоимость подсистемы n -го уровня состоит из суммы стоимостей входящих в нее подсистем или элементов, расположенных на уровнях $p > n + 1$ более низкого порядка. Стоимостные характеристики подсистем строятся на графе входимости при заданных стоимостных характеристиках элементов низших уровней. При этом приходится решать оптимизационную задачу: надо найти элементы, которые обеспечивали бы требуемые показатели качества при минимальной стоимости подсистемы верхнего уровня.

Теоретический анализ вибраций проведен на основе выражений (12) и (14). Было выявлено, что основная частота пульсаций электромагнитного момента определяется частотой изменения структуры цепи инвертором ПЧ. При неисправностях в ПЧ появляются гармоники более низких частот, обусловленные как выходным напряжением фильтра, так и искажением симметрии работы клапанов инвертора.

Экспериментальные исследования подтвердили наличие сложной картины вибраций АД при работе его от ПЧ и зависимость ее от режима работы преобразователя.

В заключении приведены основные результаты, полученные в диссертации. Они показывают, что в работе решены задачи, заключающиеся в анализе и классификации погрешностей систем контроля вибрации асинхронных двигателей, в разработке экспериментально-расчетных методов и систем контроля вибрационных процессов асинхронных двигателей на основе учета характеристик исследуемого спектра параметров систем контроля, в исследовании зависимости пульсирующих магнитных сил в зазоре электрических машин для системы ПЧ-АД от ее характеристик и разработке на этой основе модели вибрации асинхронного двигателя, в разработке методики проектирования систем контроля вибрации электрических машин на основе критерия «погрешность - стоимость», в разработке системы контроля вибрации электрических машин и экспериментальных исследованиях.

Приложения содержат акты об использовании результатов диссертационной работы, подтверждающие их практическую значимость.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработан **новый** метод контроля спектральных характеристик **вибрации** электрических машин на основе **оценивания** текущих статистических характеристик. Показано, что для уменьшения зависимости точности оценки спектральной характеристики от вида анализируемого спектра необходимо определять время усреднения в каждой частотной полосе **анализа** по результатам измерения текущей случайной погрешности. Это позволяет получить **оценки** спектральных характеристик исследуемой вибрации с заданной точностью.

2. Предложена новая метрологическая характеристика систем контроля, которая связывает спектральные характеристики исследуемых процессов с параметрами систем контроля. Это позволяет оценить качество различных методов спектрального анализа.

3. Проведены **исследования** зависимости пульсирующих магнитных сил в зазоре электрической машины для системы ПЧ-АД *m* ее характеристик. Установлено, что пульсации электромагнитного момента определяются схемой работы вентиля преобразователя частоты и качеством сглаживания выпрямленного напряжения. Это позволяет получить зависимость **вибраций** асинхронного двигателя от процессов в преобразователе частоты.

4. Разработан метод оптимизации параметров систем контроля, **минимизирующий** суммарную методическую погрешность средств **измерения** спектральных характеристик вибрации. Это позволяет определить наиболее эффективные пути уменьшения погрешностей с учетом априорных данных об исследуемых процессах.

5. Разработана методика проектирования систем контроля вибрации электрических машин на основе критерия «погрешность - стоимость». Это позволяет свести задачу проектирования к задаче выбора наилучшего варианта из множества известных.

Таким образом, задача, заключающаяся в разработке экспериментально-расчетных методов и систем контроля вибрации асинхронных двигателей с требуемой точностью измерения, решена.

Основные результаты работы изложены в следующих публикациях:

1. Тарасова Н.А., Миляшов Н.Ф., Катков С.Н. Преобразователь частоты для двухфазного асинхронного двигателя // **Материалы докладов республиканской научной конференции «Проблемы энергетики»**. Ч.2. / Тр. Казан. фил. Моск. энерг. ин-та, 1997. С.20.

2. Тарасова Н.А., Гайнутдинов Р.Я., Гайнутдинов М.Р. Частотное регулирование производительности в погружных электронасосах // **Материалы докладов республиканской научной конференции «Проблемы энергетики»**. Ч.2. / Тр. Казан. фил. Моск. энерг. ин-та, 1997. С.25.

3. Тарасова НА, **Миляшов Н.Ф.**, Катков С.Н. Электромагнитные переходные процессы в двухфазной системе ПЧ-АД // Электроэнергетика. Межвуз. темат. сб. научн. трудов. Казань: **Казан. фил. Моск. энерг ин-та**, 1998. С.139-142.

4. Тарасов В.Н., Тарасова Н.А. Влияние несимметрии напряжений на характеристики машинно-вентильных систем при 120-градусной коммутации // Вопросы совершенствования боевого применения и разработок артиллерийского вооружения и ракетной техники. Материалы докладов и сообщений XVI Военно-технической конференции. Казань: **Казан. фил. воен. арт. ун-та**, 1999. С.97.

5. Тарасов В.Н., Тарасова Н.А. Процессы в ЭМТС с АД со 180-градусной коммутацией при несимметрии выходных напряжений // Вопросы совершенствования боевого применения и разработок артиллерийского вооружения и ракетной техники. Материалы докладов и сообщений XVI Военно-технической конференции. Казань: **Казан. фил. воен. арт. ун-та**, 1999. С.115.

6. Тарасов В.Н., Тарасова Н.А. Оценка влияния несимметрии выходных напряжений инвертора на характеристики системы ПЧ-АД // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике. Материалы III Всерос. научн.-техн. конф. Чебоксары: Изд-во **Чуваш. ун-та**, 2000. С.145.

7. Баширов З.А., Волошановский А.Ю., Тарасова Н.А. Синтез пространственно-временной системы для акустической диагностики электротехнического оборудования // РНСЭ: Материалы докладов. Казань: **Казан. гос. энерг. ун-т**, 2001. – Т. II. С. 163-165.

8. Баширов З.А., **Насыров И.Р.**, Тарасова Н.А. Методы спектрального анализа /У Внутрикамерные процессы в энергетических установках, акустика, диагностика, экология. Тезисы докладов XIV Всерос. научн.-техн. конф **Казан. фил. воен. арт. ун-та**. Казань: Изд-во КФВАУ, 2002. Ч. I. С.160-163.

9 Тарасова Н.А., Баширов З.А. Метрологические характеристики средств спектрального анализа // Известия Вузов. Проблемы энергетики. 2002. № 11-12 СМ 14-116.

Лиц. № 00743 от 28.08.2000 г.

Подписано к печати

10.01.03

Формат 60×84/16

Гарнитура "Times"

Вид печати РОМ

Бумага офсетная

Физ. печ. л. 1,0

Усл. печ. л. 0,94

Уч. изд. л. 1,0

Тираж 100 экз.

Заказ № 779

Типография КГЭУ

420066, Казань, Красносельская, 51