



Сагтаров Роберт Радилович, доцент той же кафедры. Дипл. физик-геофизик (БГУ, 1996). Канд. техн. наук по элементам и системам управления (УГАТУ, 1999). Иссл. в обл. электромеханических преобразователей энергии.

Трофимов Алексей Викторович, ст. преп. той же кафедры. Дипл. инж.-электромех. (УГАТУ, 2000). Иссл. в обл. электромеханических преобразователей энергии.

УДК 621.313.1.004.58

И. Х. ХАЙРУЛЛИН, Д. Ю. ПАШАЛИ

ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПО ВНЕШНЕМУ МАГНИТНОМУ ПОЛЮ

Рассматриваются вопросы диагностики электромеханических преобразователей по внешнему магнитному полю. Обсуждаются полученные результаты, в том числе диагностические признаки и особенности практического применения метода. *Электромеханический преобразователь; диагностика; внешнее магнитное поле*

Электрические машины используются в приводах практически во всех областях техники и технологического оснащения производства. Их внезапная остановка или внезапный отказ сопровождаются значительными экономическими потерями. Особенно велики потери на крупных энергетических установках и объектах, поэтому техническая диагностика в этой области достаточно развита и является обязательной для предупреждения отказов и своевременного ремонта. Значительно меньшее внимание уделяется диагностике энергетических установок средней и малой мощности, однако их значимость, ввиду развития автономных приводов и массовости последних, постоянно возрастает. Диагностика в основном [1, 2] осуществляется тепловым, электрическим и виброакустическим методами, которые в определенных ситуациях, таких как низкие температуры, виброакустические помехи и т.д., не обеспечивают необходимой достоверности информации. Решение современных задач диагностики требует привлечения принципиально новых методов и средств, к ним можно отнести диагностирование по картине внешнего магнитного поля (ВМП). При этом измеряется бесконтактным методом и, что важно, в рабочем режиме. Использование ВМП в качестве как основного, так и дополнительного источника диагностической информации позволяет более достоверно оценить техническое состояние и прогнозировать отказы электрических машин. Несмотря на очевидные достоинства, характеристики ВМП как диагностического параметра мало изучены и практически не используются при оценке технического состояния электромеханических преобразователей (ЭМП), поэтому развитие теории и технических средств диагностики по внешнему магнитному по-

лю является актуальной научно-технической задачей. Следовательно, необходима разработка математических моделей, в частности, для наиболее распространенных преобразователей — асинхронных двигателей и ЭМП с распределенной вторичной системой, а также разработка диагностических устройств для определения технического состояния ЭМП по внешнему магнитному полю.

ВНЕШНЕЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ВТОРИЧНОЙ СИСТЕМОЙ

В целях исследования и диагностики ЭМП с распределенной вторичной системой с магнитной несимметрией поперечного сечения активной части можно представить в виде модели со смещенными осями внутреннего и наружного магнитопроводов. Для данного варианта разработана математическая модель при следующих допущениях: величина немагнитного зазора намного меньше радиуса его кривизны; электромагнитное поле в зазоре плоскопараллельное; первичное поле вне индуктора отсутствует; магнитная проницаемость немагнитного зазора равна проницаемости вакуума; на наружной поверхности отсутствуют концентраторы магнитного поля (выступы и пазы).

Система цилиндрических координат неподвижна относительно вращающегося ротора. С учетом принятых допущений из уравнений Максвелла для медленно движущихся тел могут быть получены три системы исходных уравнений в виде, удобном для аналитического решения. По методу двух реакций наведенное во вторичной системе магнитное поле раскладывается по поперечной и продольной осям. Постоянные интегрирования определяются из граничных условий:

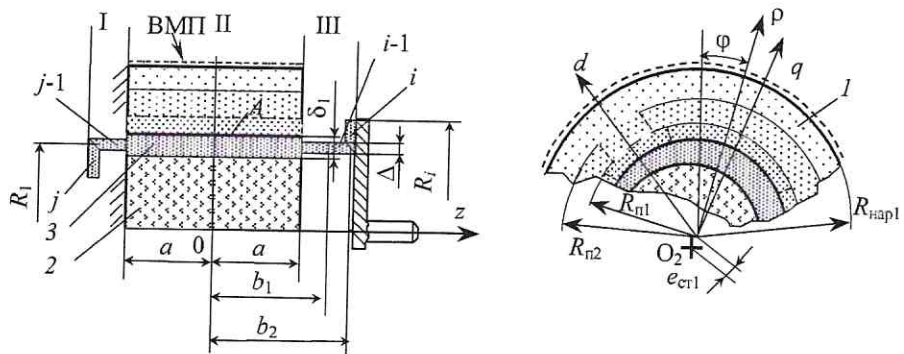


Рис. 1. Расчётная схема ЭМП с распределенной вторичной системой

равенства на границах зон нормальных составляющих плотности тока и тангенциальных составляющих напряженности электрического поля.

Выражение для комплексной амплитуды радиальной составляющей напряженности в зазоре (δ_1), учитывающее техническое состояние машины по равномерности зазора [3], имеет вид

$$\dot{H}_\rho = \sum_{\nu=1}^n \left[\left(1 + \frac{1}{\sqrt{k}} \right) (C_1 \operatorname{ch} \lambda_1 z + C_2 \operatorname{sh} \lambda_3 z) + \left(1 - \frac{1}{\sqrt{k}} \right) (C_2 \operatorname{ch} \lambda_2 + C_4 \operatorname{sh} \lambda_4) - A' \left(1 + j \frac{1}{\varepsilon k} \right) \right], \quad (1)$$

где $A' = \frac{B_{\delta_{\text{нпн}}} \varepsilon^2}{1 + \varepsilon^2 k}$; $B_{\delta_{\text{нпн}}} = B_{\delta_{\text{нп}}} \left[e^{j p \varphi} + \frac{e_{\text{ст1}} \vartheta_1}{2 u_1} \times (e^{j(p+1)\varphi} + e^{j(p-1)\varphi}) \right]$; $u_1 = \frac{1}{\sqrt{1 - e_{\text{ст1}}^2}}$; $\vartheta_1 = 2 \frac{1 - \sqrt{1 - e_{\text{ст1}}^2}}{e_{\text{ст1}}^2 \sqrt{1 - e_{\text{ст1}}^2}}$; $e_{\text{ст1}} = d_1 / \delta_1$ — статический эксцентриситет; d_1 — расстояние смещения осей наружного и внутреннего магнитопроводов; $\lambda_1 \dots \lambda_4$ — корни характеристического уравнения; $B_{\delta_{\text{нп}}}$ — амплитуда индукции начального магнитного поля; $n = 1, 2, 3, \dots$; ε — магнитное число Рейнольдса; $k = \frac{k_d}{k_q}$; k_d, k_q — коэффициенты приведения по продольной и поперечной осям.

Комплексная амплитуда напряженности магнитного поля во внешнем магнитопроводе ЭМП с распределенной вторичной системой при известном (1)

$$\dot{H}_{\rho \text{ ннд}} = \dot{H}_\rho \frac{R_1 (\mu'_1 + \mu'_2 + \dots + \mu'_k)}{\mu_r R}, \quad (2)$$

где $R_1 + \frac{\delta_1}{2} \leq R \leq R_{\text{нар1}}$; $R_{\text{II}}, R_{\text{II2}}$ — размеры характерных участков магнитной цепи (рис. 1); μ'_1 — магнитная проницаемость участка ($R_{\text{нар1}} - R_{\text{II}}$), отнесенная к μ_r ; μ'_2 — соответственно участка ($R_{\text{II2}} - R_{\text{II}}$) и т. д.

С учётом известных положений по определению полей экранирующих устройств, картины поля на границе двух сред и выражений (1), (2)

математическая модель ВМП ЭМП с распределенной вторичной системой

$$\dot{H}_{\rho \text{ вмпт}} = \sum_1^n \frac{6\pi^2 \sqrt{r_1 \varpi_{\text{н}} \varpi_{\text{вн}}} \exp \left\{ \delta_1 \sqrt{\left[\frac{\pi(2n-1)}{2a} \right]^2 + \alpha_i^2} \right\}}{\left((r_1 \varpi_{\text{н}} + \varpi_{\text{вн}}) \operatorname{ch} (\varpi_{\text{н}} - \varpi_{\text{вн}}) + \mu_r \chi_{\text{вн}} \left(1 - \frac{r_1 \varpi_{\text{н}} \varpi_{\text{вн}}}{\mu_r^2 \chi_{\text{н}}^2} \right) \operatorname{sh} (\varpi_{\text{н}} - \varpi_{\text{вн}}) \right)} \times \dot{H}_{\rho \text{ нндт}} \left(\frac{2R_{\text{нар1}} + r_{\text{вн1}}}{2} + \frac{1}{\alpha_i \sqrt{\varepsilon \frac{k_d}{2}}} \right), \quad (3)$$

где $r_1 = \frac{\chi_{\text{вн}}}{\chi_{\text{н}}}$; $\alpha_i = \frac{\pi}{\tau}$; $\tau = \frac{\pi R_1}{p}$; $R_{\text{нар1}}, R_{\text{II}}, R_{\text{II2}}, \Delta, R_1, \delta_1, a$ — геометрические размеры (рис. 1); $h_{\text{II}} = R_{\text{нар1}} - (R_1 + \frac{\delta_1}{2})$; $r_{\text{вн1}} \geq R_{\text{нар1}}$; k_d — коэффициент приведения по продольной оси;

$$\varpi_{\text{н}} = j \sqrt{j p_{\text{вм}} \mu_r \varepsilon + (R_1 + h_{\text{II}})^2 \left(\frac{\pi(2n-1)^2}{4a^2} + \alpha_i^2 \right)};$$

$$\chi_{\text{вн}} = \left(R_1 + \frac{\delta_1}{2} \right) \sqrt{\frac{\pi(2n-1)}{2a} + \alpha_i^2};$$

$$\chi_{\text{н}} = (R_1 + h_{\text{II}}) \sqrt{\left(\frac{\pi(2n-1)}{2a} \right) + \alpha_i^2};$$

$$\varpi_{\text{вн}} = j \sqrt{j p_{\text{вм}} \mu_r \varepsilon + \left(R_1 + \frac{\delta_1}{2} \right)^2 \left(\frac{\pi(2n-1)^2}{4a^2} + \alpha_i^2 \right)};$$

$p_{\text{вм}}$ — число пар полюсов произвольной гармоники МДС внутреннего магнитопровода; μ_r — относительная магнитная проницаемость материала индуктора.

ВНЕШНЕЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Разработана математическая модель для диагностики по внешнему магнитному полю асинхронных двигателей с магнитной несимметрией

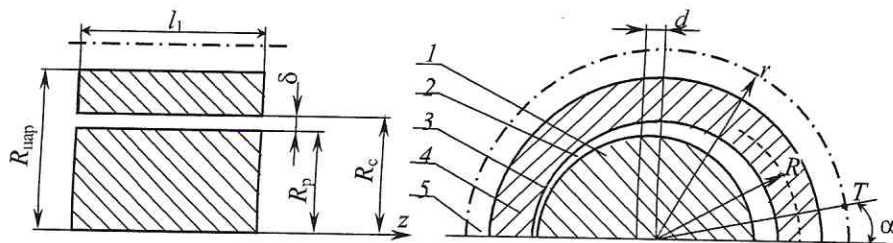


Рис. 2. Расчётная схема асинхронного двигателя: 1 — ротор; 2 — воздушный зазор; 3 — токовый слой; 4 — статор; 5 — ВМП асинхронного двигателя; T — произвольная точка пространства, где определяется ВМП

поперечного сечения активной части на базе физической модели двигателя со статическим эксцентриситетом ротора, при следующих допущениях: активная длина машины принята бесконечно большой; на сердечниках статора и ротора отсутствуют пазы; обмотка управления представлена в виде бесконечно тонкого токового слоя, покрывающего расточку статора, создающего основную гармонику намагничивающей силы, изменяющуюся по синусоидальному закону вдоль расточки; индуктор имеет гладкую (отсутствуют концентраторы магнитного поля) наружную цилиндрическую круговую поверхность. Расчётная схема приведена на рис. 2.

ВМП асинхронного двигателя может быть представлено в виде [3]

$$\dot{H}_{\text{вмп}\nu} = \dot{H}_{\text{инд}} \frac{\sqrt{\psi_n \psi_b} \exp(2n_m \pi (\zeta_n - \zeta_b))}{\left(r_{\text{вн}} (\psi_n + \psi_b) \operatorname{ch}(\xi_n - \xi_b) + (1 + \psi_n \psi_b) \operatorname{sh}(\xi_n - \xi_b) \right)} \times \left(\frac{2R_{\text{нар}} + r_{\text{вн}}}{2} + \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\omega \gamma_c \mu_r}} \right), \quad (4)$$

$$\dot{H}_{\text{вмп}} = \sum_{\nu=1}^n \dot{H}_{\text{вмп}\nu}, \quad (5)$$

где $r_{\text{вн}} \geq R_{\text{нар}}$; $n_m = 4$; $R_{\text{нар}}$ — наружный радиус магнитопровода статора; $\psi_n = \frac{\xi_n}{\zeta_n \mu_r}$; $\psi_b = \frac{\xi_b}{\zeta_b \mu_r}$; $\lambda_r = \frac{\pi(2n-1)}{l_1}$; $\xi_n = j \sqrt{j \omega p_{\nu i} \mu_r \gamma_c R_{\text{нар}}^2 + \zeta_n^2}$; $n = 1, 2, 3 \dots$; $\zeta_n = \sqrt{(\lambda_r R_{\text{нар}})^2 + p_{\nu i}^2}$; $\xi_b = j \sqrt{j \omega p_{\nu i} \mu_r \gamma_c R_{\text{нар}}^2 + \zeta_b^2}$; $\zeta_b = \sqrt{(\lambda_r R_b)^2 - p_{\nu i}^2}$; $p_{\nu i}$ — число пар полюсов произвольной гармоники МДС статора; для основной гармоники $p_{\nu i} = p$; γ_c — удельная электрическая проводимость материала статора.

$$H_{\delta 1} = A_m h_i, \quad h_i = \frac{r' u_k}{\left(\frac{1}{l_1 \sqrt{l_1}} \left(\sqrt{\int_0^{l_1} f_{i_c} g_{i_c} dz} - \sqrt{\int_0^{l_1} f_{i_p} g_{i_p} dz} \right) - \rho'_c \cos(\alpha/2) \right)} \times \left\{ \cos(p\alpha - \omega t) + \frac{e_{\text{ст}} \vartheta}{2u_k} \left[\cos((p+1)\alpha - (\omega + \omega_{\text{эст}})t) + \right. \right.$$

$$\left. + \cos((p-1)\alpha - (\omega - \omega_{\text{эст}})t) \right\}, \quad (6)$$

где A_m — амплитуда линейной токовой нагрузки; l_1 — активная длина машины; $r' = \frac{R_c}{l_1}$ — относительный радиус статора; $\rho'_c = \frac{e_c}{l_1}$ — относительное среднее значение овальности статора; R_c — номинальный радиус внутренней расточки статора; R_p — номинальный радиус ротора; p — число пар полюсов машины; α — координата в системе, неподвижной относительно статора; ω — угловая частота сети $\omega = 2\pi f$; f — частота сети; $e_{\text{ст}}$ — относительный статический эксцентриситет $e_{\text{ст}} = \frac{d}{\delta}$; d — расстояние смещения осей ротора и статора; $\delta = R_c - R_p$ — номинальный воздушный зазор; $\omega_{\text{эст}}$ — частота токов (гармоники), вызванная эксцентриситетом, скорректированная по скольжению $\omega_{\text{эст}} = (1-s) \frac{\omega}{p}$, при заторможенном роторе $\omega_{\text{эст}} = 0$; s — скольжение прямо-вращающейся волны первой гармоники магнитной индукции относительно ротора; $u_k = \frac{1}{\sqrt{1-e_{\text{ст}}^2}}$; $\vartheta = 2 \frac{1 - \sqrt{1-e_{\text{ст}}^2}}{e_{\text{ст}}^2 \sqrt{1-e_{\text{ст}}^2}}$.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

На основе результатов, полученных в работе, для проверки возможности использования внешнего магнитного поля как диагностического сигнала разработано оборудование, предназначенное для экспериментальных исследований и диагностики асинхронных двигателей и ЭМП с распределенной вторичной системой, и оценены его метрологические характеристики. При разработке были использованы оригинальные технические решения, подтвержденные двумя патентами [4, 5]. В составе измерительно-вычислительного моделирующего диагностического комплекса — экспериментальные установки для исследования асинхронных двигателей и ЭМП с распределенной вторичной системой — выполняли следующие функции: подключение исследуемого объекта, управление им, измерение основных механических или электромеханических характеристик,

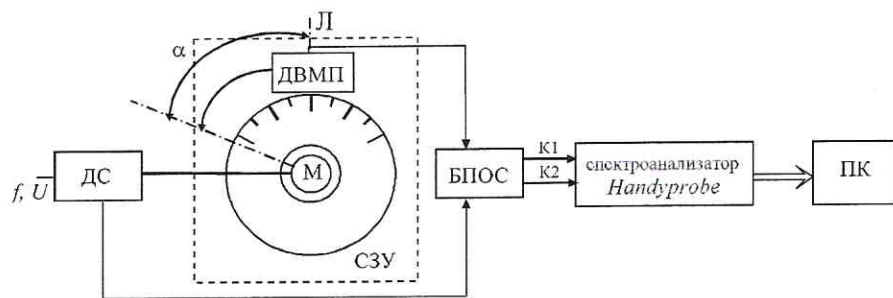


Рис. 3. Структурная схема экспериментальной установки для исследования внешнего магнитного поля ЭМП: М — исследуемая машина; ДВМП — датчик индукционный внешнего магнитного поля; СЗУ — система задания углового положения ДВМП; ДС — датчик сети; БПОС — блок предварительной обработки сигнала (усилитель сигнала ДВМП и режекторный фильтр); ПК — персональный компьютер

создание нагрузки (задание определенного режима работы), моделирование неисправных состояний, измерение внешнего магнитного поля в окружающем объект пространстве в заданных координатах, математическая обработка данных измерений, спектральный анализ, запись результатов и выдача его на экран персонального компьютера. Структурная схема экспериментальной установки для исследования асинхронных двигателей приведена на рис. 3.

Исследуемый объект диагностировался в заданных режимах работы. Сигналы датчиков ДС и ДВМП усиливались и фильтровались БПОС и передавались на аналого-цифровую измерительную приставку к ПК — *Handyprobe*. Получаемые таблицы данных спектроанализатора (формат частота-падение напряжения канала 1-падение напряжения канала 2) вводились для последующей обработки в пакет электронных таблиц *Microsoft Excel*. Определялось математическое ожидание значения напряжения для каждой частоты в спектре напряжения при одном и том же положении ДВМП и затем, после отбрасывания промахов, по значению напряжения проводился расчет напряженности внешнего магнитного поля с использованием пакета *Microsoft Excel*. Погрешность измерения не превышала 5%. Число повторных опытов — 16. Данные спектроанализатора записывались в файл на жесткий диск компью-

тера в следующем формате: число выборок сигнала 512, диапазон частот 250 Гц. Амплитудное значение ЭДС ДВМП автоматически корректировалось в зависимости от изменения данных датчика сети (ДС), что позволило при анализе осциллограмм исключить из рассмотрения сетевые помехи. Гармонический состав ВМП определялся по опытной кривой его распределения. Исследования проводились для асинхронных двигателей с различным числом пар полюсов в режимах: холостого хода, под нагрузкой и короткого замыкания, и для ЭМП с распределенной вторичной системой в режиме нагрузки и при неподвижном роторе. Анализ распределения поля в основном проводился по данным замеров при расположении ДВМП на расстоянии 0,2 мм от поверхности ЭМП. Эксцентриситет моделировался в пределах от нуля до 0,3δ.

На рис. 4 приведены кривые ВМП ЭМП с распределенной вторичной системой, полученные в ходе теоретических и экспериментальных исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выводы. Для целей диагностики исследовано ВМП ЭМП с распределенной вторичной системой и асинхронных двигателей разработаны математические модели как функции параметров,

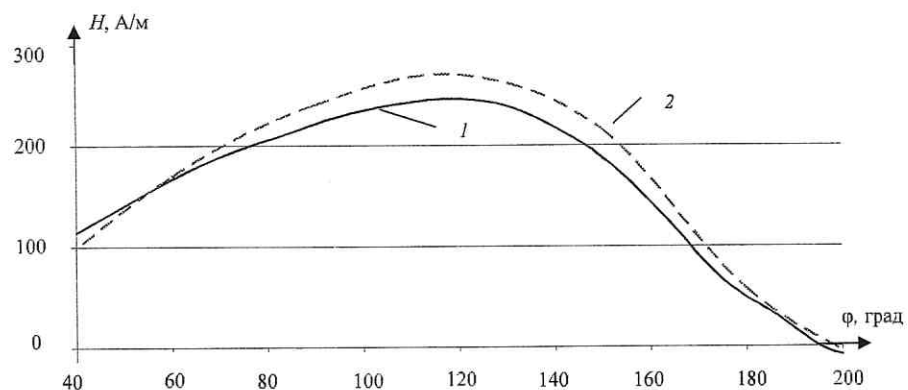


Рис. 4. Распределение напряженности внешнего поля над поверхностью ЭМП ($r_{вн}/R_{нар} = 0,005$) на краю индуктора; $\epsilon_{ст} = 0,3$; 1 — расчётные данные; 2 — экспериментальные данные

сопоставление которых определяет диагностические признаки состояния, учитывающие влияние геометрических соотношений активных элементов конструкции, технологических и эксплуатационных факторов на техническое состояние машин.

Разработаны измерительно-вычислительные моделирующие диагностические комплексы, на которых проведены экспериментальные исследования спектральных характеристик внешнего магнитного поля электромеханических преобразователей, с имитацией технологических и эксплуатационных дефектов. Эксперимент подтверждает справедливость принятых допущений и достоверность основных теоретических положений и выводов, полученных в работе. Расхождение расчётных и опытных данных составляет 10–14%.

При неисправном техническом состоянии ротора ЭМП с распределенной вторичной системой в виде нарушения электрической проводимости или недопустимого режима вращения напряженность внешнего магнитного поля изменяется в пределах 10–60%, что позволяет выявлять подобные дефекты вторичной системы.

В электрической машине с распределенной вторичной системой при изменении величины относительного эксцентриситета зазора от 0,1 до 0,3 и числа Рейнольдса от 0,5 до 3 изменение реальной части комплексной амплитуды внешнего магнитного поля составляет от 10 до 25%, причем меньшее изменение соответствует большему числу полюсов.

При несоосности статора и ротора асинхронного двигателя амплитуда основной гармоники напряженности внешнего магнитного поля в зависимости от числа пар полюсов возрастает на 15–20%.

Задачи развития метода. Дальнейшим направлением работы в области использования ВМП является решение следующих задач:

- Разработка методики диагностирования, которая включает определение возможно большего числа диагностических признаков. ВМП, являясь косвенным признаком, может быть выявлено и измерено в ходе технологического процесса или эксплуатации.

- Развитие метрологического обеспечения сбора данных, т.е. совершенствование измерительно-вычислительных моделирующих диагностических комплексов. От решения данной задачи зависит достоверность получаемой диагностической информации, надежность и стоимость диагностической системы.

- Формирование диагностических критериев, т.е. определение численных значений параметров ВМП и других признаков, образующих комплексы, отражающие корреляционную связь с наличием того или иного дефекта, либо со степенью его развития. Во многих случаях различные дефекты, неполадки и отклонения в работе ЭМП имеют сходные признаки. Поэтому возникает вопрос о дифференциальной диагностике, т.е. разработ-

ке способов достоверного разделения причин изменения параметров.

- На основе выбранных критериев формирование алгоритма диагностики с привлечением соответствующего математического и логического аппарата, сочетающегося с выбранной методикой диагностирования и характеристиками диагностируемого объекта.

- Создание экспертных систем, которые являются наивысшей формой алгоритма диагностики. При разработке таких систем необходимо приоритетно повышать уровень методик работы и квалификации персонала, позволяющих синтезировать и анализировать чаще всего противоречивую информацию, оценивать вероятность появления той или иной неисправности, принимать адекватное решение и делать выводы о правильности действий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Потапов, В. Н.** Диагностирование авиационных электрических машин / В. Н. Потапов. М.: Транспорт, 1989. 101 с.
2. **Гафуров, Р. А.** Испытания и диагностика двигателей летательных аппаратов. Оптические, электрические и радиометрические измерения в диагностических системах: учебное пособие / Р. А. Гафуров, З. Г. Левченко. Казань, 1981. 90 с.
3. **Пашали, Д. Ю.** Диагностика электромеханических преобразователей по внешнему магнитному полю. Дис. ... канд. техн. наук / Д. Ю. Пашали. Уфа, 2004.
4. **Пат. РФ № 2178139.** Измеритель линейных перемещений. МКИ G 01 B 7/14 / М. А. Ураксеев, Д. Ю. Пашали. Опубл. 10.01.02. БИ № 1.
5. **Пат. РФ № 2189562.** Датчик перемещений (варианты). МКИ G 01 B 7/14 / М. А. Ураксеев, Д. Ю. Пашали. Опубл. 20.09.2002. БИ № 26.

ОБ АВТОРАХ



Хайруллин Ирек Ханифович, проф. каф. электромеханики. Дипл. инж.-электромех. (Ивановск. энергетич. ин-т, 1963). Д-р техн. наук по элементам и устройствам управл. (УАИ, 1981). Тр. по электромеханич. преобразователям энергии.



Пашали Диана Юрьевна, ст. преп. той же кафедры. Дипл. инж. по приборостроению (УГАТУ, 1994). Канд. техн. наук по электромех. и электр. аппаратам (УГАТУ, 2004). Иссл. в обл. надежности электромех. систем.