

МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ СЕЗОННО ЭКСПЛУАТИРУЕМОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВОЛНОВОГО ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА

В.И. Сташко, И.Б. Губин

Изоляция асинхронных электродвигателей (АД), применяемых в различном электрооборудовании, представляет собой многокомпонентную электроизоляционную систему [1 - 5]. В процессе эксплуатации на нее действует широкий комплекс дестабилизирующих факторов, приводящих к изменению ее состояния [6].

Техническое состояние изоляции АД можно оценить с помощью интегральных диагностических параметров [9, 10]. В общем случае они должны объективно описывать состояние межвитковой и корпусной изоляции АД. Для целей прогнозирования предпочтительно иметь один обобщенный диагностический параметр, характеризующий состояние всей изоляционной системы, а не группу параметров. Использование группы диагностических параметров дает более объективную картину состояния изоляции, но

усложняет процедуру прогнозирования, приводит к громоздкости и неудобному практическому использованию разрабатываемых математических моделей и методов.

В настоящее время актуальной становится проблема использования для целей оценки технического состояния изоляции АД параметров, определяемых на основе современных методов диагностирования. В частности, использование метода диагностирования изоляции обмоток АД на основе параметров переходного процесса, возникающего при тестировании обмотки импульсом напряжения, является эффективным методом неразрушающих испытаний [9, 10].

Схема тестирования обмотки статора АД импульсами напряжения представлена на рис. 1.

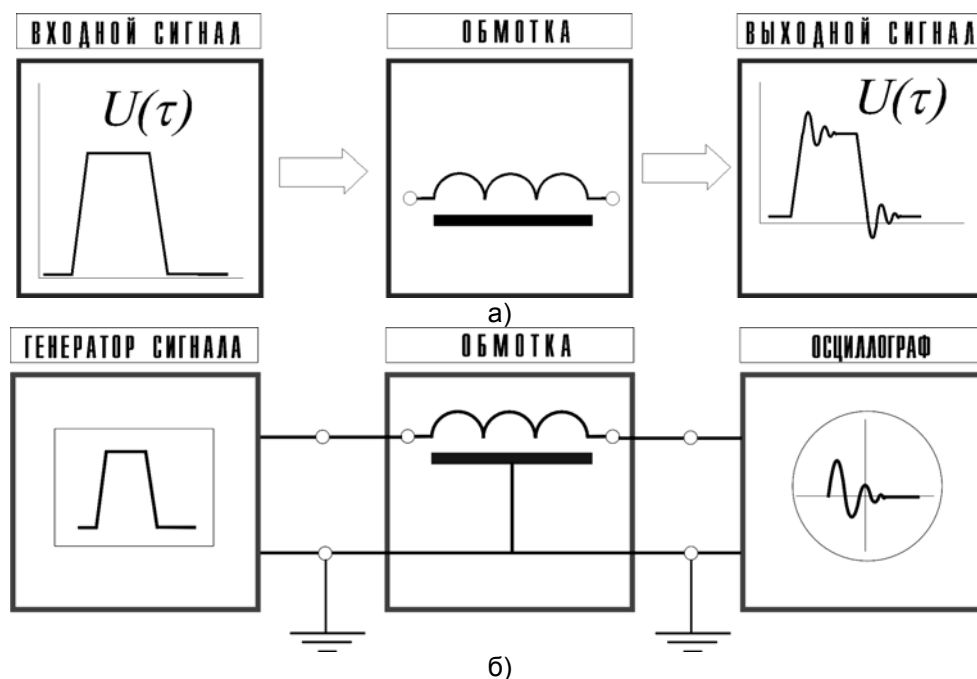


Рис. 1. Схемы тестирования обмотки статора электродвигателей импульсами напряжения:

а) общая схема тестирования; б) схема тестирования обмотки статора АД с использованием генератора импульсов и осциллографа.

Данные параметры можно интерпретировать как отклик (реакцию) системы на тестовое возмущение, по которому оценивают ее состояние в целом. Данные диагностические параметры изоляции обмоток АД являются интегральными параметрами, характеризующими все составляющие элементы ее электрической модели.

Параметром, который наиболее полно описывает переходный процесс и позволяет оценить состояние изоляции обмоток электрических машин, является модифицированный обобщенный диагностический параметр (МОДП) F , определяемый при тестировании изоляции обмотки статора импульсом напряжения.

Он представляет собой отношение декремента затухания к периоду затухания переходного процесса и показывает, с одной стороны, изменение амплитуды за один период, а с другой - скорость затухания колебаний во времени:

$$F = \frac{d}{T}, \quad (1)$$

где $d = \ln(U_1/U_2)$ - декремент затухания; U_1, U_2 - амплитуды затухающих колебаний соответственно первого и второго положительных полупериодов; T - период затуханий.

Этот параметр F формально представляет собой произведение декремента затухания и частоты затухающих колебаний. Он характеризует одновременно и изменение амплитуд свободных колебаний в логарифмическом масштабе, и скорость данного процесса во времени.

Данный параметр является интегральной характеристикой состояния межвитковой и корпусной изоляции обмоток статора,

Диагностический параметр F определяется функцией $U = U(t)$ - распределением мгновенных значений напряжения на конце обмотки при подаче на ее начало тестового сигнала $F = f(U(t))$. Значения данной функции зависят от параметров схемы замещения обмотки, а значит и от состояния изоляции обмотки ЭД $U(t) = f(R, L, C, K, G)$, где R, L, C, K, G - параметры схемы замещения обмотки электродвигателя.

Следовательно, диагностический параметр F определяется параметрами схемы замещения обмотки и состоянием изоляции обмотки АД $F = f(R, L, C, K, G)$.

При математическом моделировании обмотки электрических машин можно представить в виде электрических цепей с распределенными параметрами (ЦРП) [11, 12].

При тестировании обмотки электрических машин импульсами напряжения процессы распространения возмущений электромагнитного поля носят характер бегущих волн, т.е. имеют место волновые процессы.

Обмотки, представленные в виде ЦРП, обладают рядом особенностей [11]:

- 1) цепь можно считать линейной;
- 2) параметры схемы замещения существенно зависят от скорости изменения напряжения (тока) на фронте бегущей волны, т.е. от крутизны фронта или от эквивалентной частоты, которая определяется по формуле

$$f_{экс} \approx 1/2t_{фр}, \quad (2)$$

где $t_{фр}$ - длительность фронта волны;

- 3) процессы в стали статора и ротора существенно влияют на волновые явления;
- 4) в схемах замещения фазных обмоток должна учитываться продольная емкость между смежными витками одной секции;
- 5) в трехфазных обмотках допустимо рассмотрение каждой фазы в отдельности ввиду незначительности индуктивных и емкостных связей между ними.

По показателям волновых процессов, возникающих при тестировании обмоток импульсами напряжения, можно оценить техническое состояние изоляции, т.е. состояние межвитковой и корпусной изоляции обмоток электрических машин [13, 14].

Электрическую машину при волновых процессах можно считать сложной системой, состоящей из ряда волноводов [11].

К числу данных волноводов относятся:

- 1) основной продольный волновод, образованный стенками паза и проводниками обмотки;
- 2) вспомогательные поперечные волноводы - вентиляционные каналы статора и ротора, а также изоляционные зазоры между стальными листами сердечников.

Пазовые части обмотки влияют на волновые явления значительно сильнее, нежели лобовые.

Электромагнитная волна, распространяясь вдоль обмотки, одновременно проникает как в проводники,

МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ СЕЗОННО
ЭКСПЛУАТИРУЕМОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВОЛНОВОГО ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА

так и в листы сердечника на так называемую эквивалентную глубину.

Вводя эквивалентную частоту по (2), получаем, что эквивалентная глубина проникновения плоской электромагнитной волны в проводящие среды равна:

- для проводников обмотки

$$\delta_a \approx \sqrt{\frac{2t_{\phi p}}{\pi \mu_0 \sigma_m}}; \quad \delta_{0,05} = 1,5 \delta_a; \quad (3)$$

- для листов стали в слабых магнитных полях

$$\delta_a \approx \sqrt{\frac{2t_{\phi p}}{\pi \mu_0 \mu_{r\sigma} \sigma_{cm}}}; \quad \delta_{0,05} = 1,6 \delta_a; \quad (4)$$

- то же в сильных магнитных полях

$$\delta'_a \approx \sqrt{\frac{2t_{\phi p}}{\pi \mu_0 \mu_{r\sigma} \sigma_{cm}}}; \quad \delta'_{0,05} = 1,4 \delta'_a; \quad (5)$$

где σ_m , σ_{cm} - удельные проводимости медных проводников и стальных листов соответственно;

$\mu_{r\sigma}$ - относительная магнитная проницаемость на внешней поверхности листа стали.

Внешнее электромагнитное поле затухает на глубине δ_a в $e = 2,72$ раз, на глубине $\delta_{0,05}$ до 5 % от своего значения на поверхности проводящей среды.

Если соблюдается условие

$$d \geq \delta_{0,05} \text{ или } d' \geq \delta'_{0,05}, \quad (6)$$

где d или d' - наименьший поперечный линейный размер сечения проводящей среды, то ее можно считать "массивным телом".

В этом случае явления поверхностного эффекта можно рассматривать, считая волну плоской.

Магнитную систему электрических машин при волновых процессах можно

считать линейной из-за малого значения μ_r . Однако там, где это целесообразно, вводятся небольшие поправки, например, в виде различия δ_a и $\delta'_{0,05}$ при слабых и сильных полях.

При расчете магнитных волновых параметров низковольтных двигателей со вспяной обмоткой приняты следующие допущения:

1) полужакрытый паз сложной овальной формы заменяется круглым закрытым пазом равной площади (рис. 2);

2) случайное расположение проводников в пазу при вспяной обмотке заменяется регулярным;

3) материалы проводников, изоляции и сердечников принимаются соответственно однородными.

Указанные допущения справедливы до частот порядка 300 кГц.

Комплексный параметр, имеющий размерность индуктивности, для отдельной катушки равен

$$\underline{L} = \frac{1}{m_i} \sum_{k=1}^w \underline{L}_k, \quad (7)$$

где m_i - число параллельных проводников в обмотке;

w - число витков в катушке;

\underline{L}_k - комплексный параметр,

соответствующий собственной индуктивности k -го витка.

Обозначим \underline{L}_σ , \underline{M}_{ki} как комплексные параметры, соответствующие собственной индуктивности витка, лежащего в круглом эквивалентном пазу, и взаимной индуктивности k -го и i -го витков, где n - число проводников в катушке.

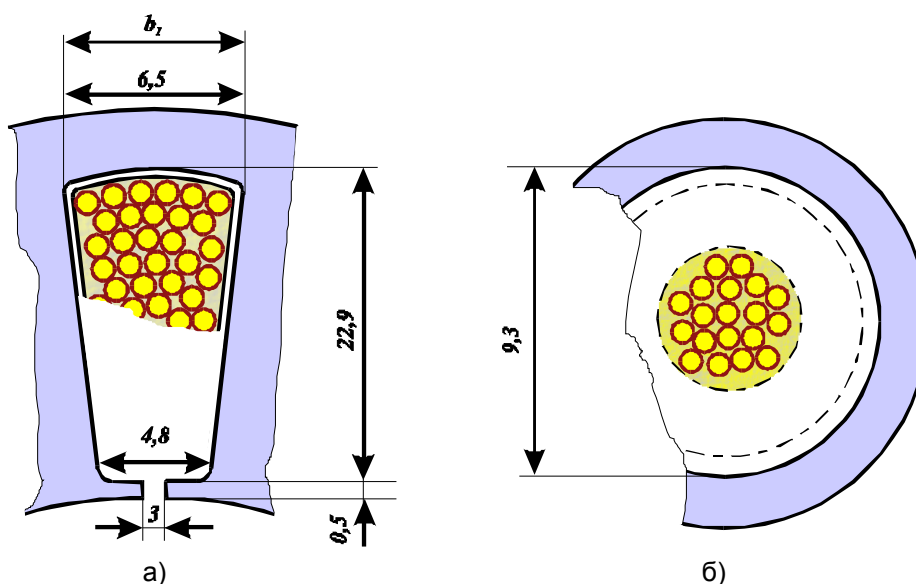


Рис. 2. Полузакрытый паз двигателя 2,2 кВт, 380/220 В, 1385 об/мин (а) и его расчетный эквивалент (б).

Далее полагаем, что

$$L_{\epsilon} = L_{cm} + L_{uz} + L_{np} = \text{Re}(L_{\epsilon}), \quad (8)$$

где слагаемые в (3.21) соответствуют потокоцеплениям в стали статора и ротора, в изоляции внутри паза и в проводнике.

Индуктивность

$$L_{cm} = \text{Re} \frac{1}{Z_{m,cm}} = \text{Re} \frac{2\mu_0 l_n}{\frac{1}{\mu_{ш}} \left(\sum_{i=1}^{\zeta} \frac{l_i}{a_i} + \frac{2\Delta_{\epsilon}}{k_{\epsilon} a_{\epsilon}} \right)}, \quad (9)$$

где l_n - длина паза.

При вычислении $Z_{m,cm}$ - пользуются чертежом реального, а не эквивалентного паза, чем заметно снижается погрешность, вносимая расчетным приемом.

Для центрального проводника эквивалентного паза (рис. 2,а)

$$L_{uz} = \frac{\mu_0 l_{\epsilon}}{2\pi} \ln \frac{R_1}{r_1}, \quad (10)$$

где l_{ϵ} - длина витка обмотки;

R_1, r_1 - радиусы эквивалентного паза и проводника без изоляции.

Проводник, расположенный вне центра паза необходимо перевести в центр паза соответствующим конформным преобразованием. После выполнения всех необходимых преобразований получаем составляющую индуктивности $L_{uz,np}$ для проводника, приведенного к центру паза:

$$L_{uz,np} = \frac{\mu_0 l_{\epsilon}}{2\pi} \ln \frac{(R_1 - x_1)(r_1 + c - x_1)}{(R_1 - x_2)(r_1 + c - x_2)}, \quad (11)$$

где c - смещение центров окружности C_1 и C_2 ; $x_{1,2}$ - корни характеристического уравнения

$$cx^2 - (R_1^2 - r_1^2 + c^2)x + cR_1^2 = 0. \quad (12)$$

Внутренняя индуктивность цилиндрического проводника

$$L_{np} = \frac{1}{\omega} \text{Im} \left[\frac{kl_{\epsilon}}{\sigma_M 2\pi r} \frac{J_0(kr)}{J_1(kr)} \right], \quad (13)$$

где $J_0(kr), J_1(kr)$ - функции Бесселя 1-го рода порядков нуль и один;

$$k = \sqrt{-j\omega\mu_0\sigma_M}.$$

Взаимная индуктивность k -го и i -го витков

$$M_{ki} = \frac{\mu_0 l_{\epsilon}}{2\pi} \ln \frac{1}{\rho_k} + \frac{2\mu_0 l_n}{\left[\frac{1}{\mu_{ш}} \sum_{i=1}^{\zeta} \frac{l_i}{a_i} + \frac{2\Delta_{\epsilon}}{k_{\epsilon} a_{\epsilon}} \right]}, \quad (14)$$

где ρ_k - расстояние от центра эквивалентного паза до центра k -го проводника.

Полное сопротивление катушки, обусловленное магнитным полем,

$$\underline{Z}_n = j\omega \underline{L} = R_n + j\omega L_n. \quad (15)$$

Активное сопротивление катушки определяется по формуле

$$R = R_n + R_M, \quad (16)$$

где

МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ СЕЗОННО
ЭКСПЛУАТИРУЕМОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВОЛНОВОГО ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА

$$R_M = \frac{w}{m_i} \operatorname{Re} \left[\frac{kl_\delta J_0(kr_1)}{\sigma_M 2\pi r_1 J_1(kr_1)} \right]. \quad (17)$$

По схеме замещения обмотки АД с учетом продольной емкости K продольное сопротивление двухполюсника для одной катушки

$$\underline{Z} = \frac{R + j\omega L}{1 + j\omega K(R + j\omega L)}. \quad (18)$$

Отсюда по опытам ХХ и КЗ можно найти магнитные параметры этого двухполюсника:

$$L = \frac{1}{\omega} \operatorname{Im} \frac{\underline{Z}}{1 - j\omega K \underline{Z}}; \quad R = \operatorname{Re} \frac{\underline{Z}}{1 - j\omega K \underline{Z}}. \quad (18)$$

Индуктивность лобовых частей низковольтных асинхронных двигателей можно отдельно не вычислять.

Параметры всей фазной обмотки

$$L_\phi = mL; \quad R_\phi = mR \quad (19)$$

где m - число пазов или групп пазов с совпадающими направлениями условных токов.

Таким образом, можно произвести расчёт всех основных параметров обмотки конкретного типа АД. Подставив полученные значения и справочные данные в уравнение описывающее волновые затухающие колебания при подаче на обмотку импульса напряжения, можно получить значения диагностических параметров. Результаты расчёта некоторых параметров обмотки статора АД приведены на рис. 3 и 4.

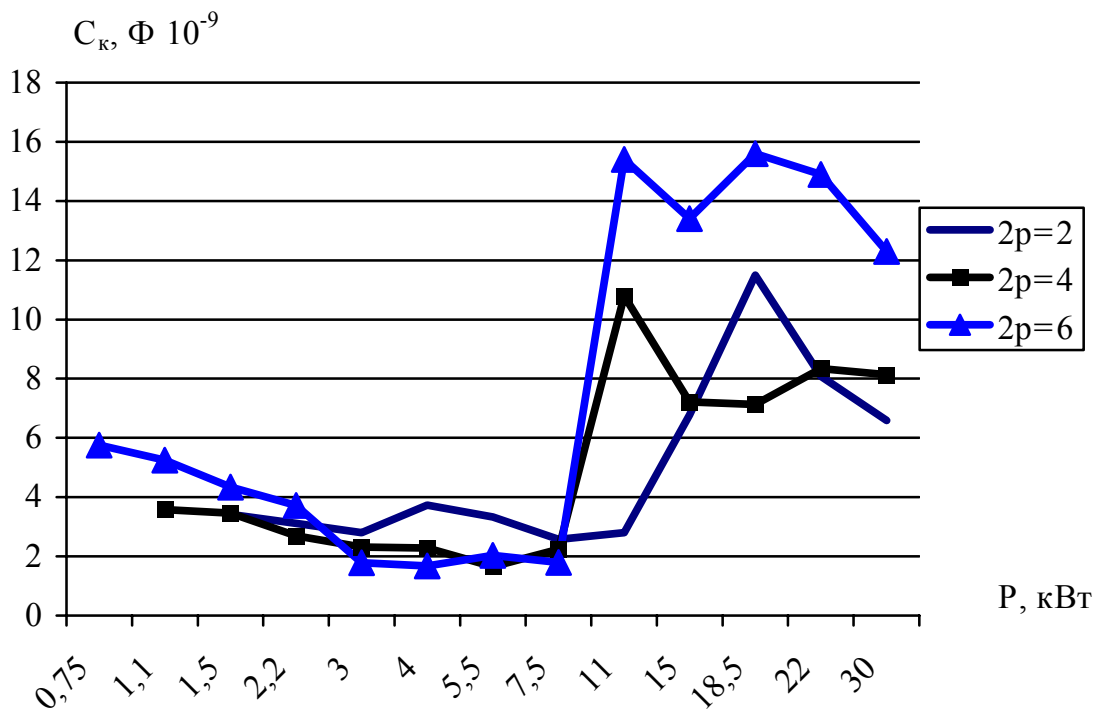


Рис. 3. Значения ёмкости изоляции обмотки статора относительно корпуса АД серии 4А.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ СЕЗОННО
ЭКСПЛУАТИРУЕМОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВОЛНОВОГО ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА

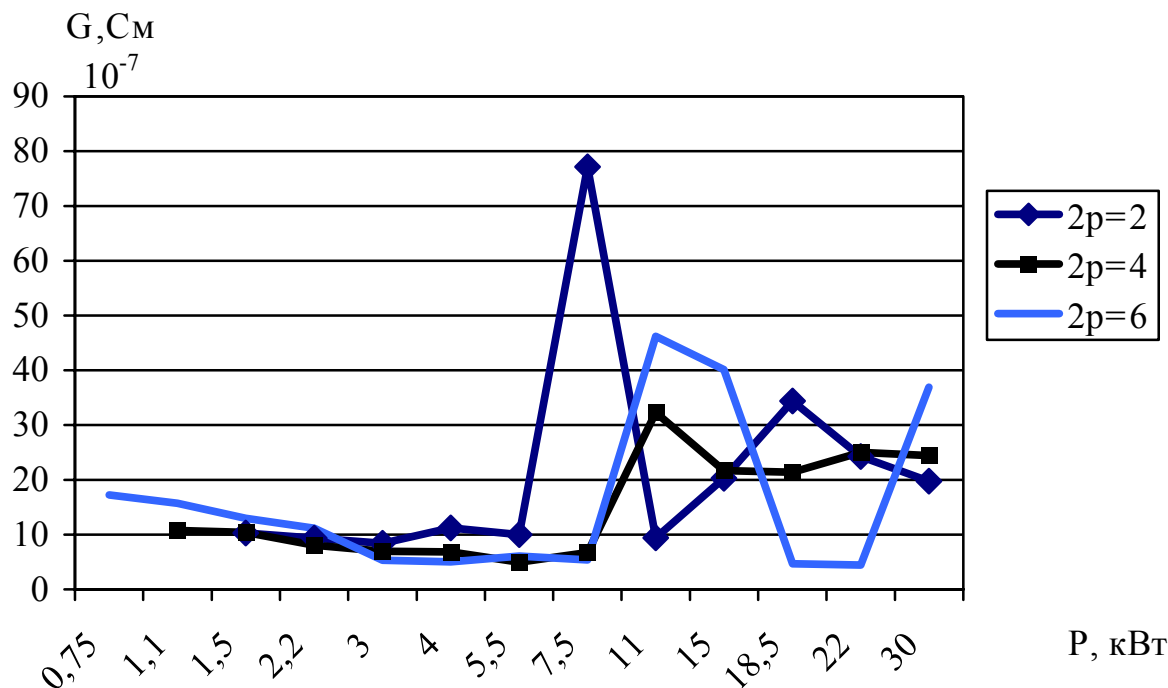


Рис. 4. Значения проводимости фазы для ряда АД серии 4А.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бернштейн Л.М. Изоляция электрических машин общего назначения. - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1981. - 376 с.: ил.
2. Антонов М.В., Герасимова Л.С. Технология производства электрических машин: Учеб. пособие для вузов. - М.: Энергоиздат, 1982. - 512 с.: ил.
3. Астахин В.В., Трезвов В.В., Суханова И.В. Электроизоляционные лаки, пленки и волокна. - М.: Химия, 1986. - 160 с.
4. Технология производства асинхронных двигателей: Специальные процессы/В.Г. Костромин, С.Б.Бронин, В.А. Дагаев и др; Под ред. В.Г.Костромин. - М.: Энергоатомиздат, 1981. - 272 с.: ил.
5. Перельмутер Н.М. Электромонтёр-обмотчик и изолировщик по ремонту электрических машин и трансформаторов. - М., 1984.
6. Пястолов А.А., Большаков А.А., Петров Г.А. Факторы, влияющие на надежность работы электродвигателей в сельском хозяйстве // Автоматизированный привод в народном хозяйстве: Сб. тр. - М.: Энергия, 1971. - Т. 4. - С. 194-195.
7. Исследование электродвигателей. Проведение хозяйственных и контрольных испытаний электродвигателей серии 4А: Отчет о НИР 86-82 / ЧИМЭСХ; Руководитель А.А. Пястолов. - № ГР 02830043044. - Челябинск, 1982. - 78 с.
8. Хомутов О.И., Упит А.Р. Исследование работы изоляции асинхронных электродвигателей в условиях сельскохозяйственных производственных помещений: Материалы научной конференции. - Барнаул, 1974. - Часть 5. - С. 45-46.
9. Хомутов О.И. Система технических средств и мероприятий повышения эксплуатационной надежности изоляции электродвигателей, используемых в сельскохозяйственном производстве: Дис. ... док. техн. наук. - Челябинск, 1990. - 450 с.
10. Хомутов О.И. Система технических средств и мероприятий по повышению надежности электрооборудования. - Барнаул, 1990. - 98 с.
11. Каганов З.Г. Электрические цепи с распределенными параметрами и цепные схемы. - М.: Энергоатомиздат, 1990. - 248 с.
12. Каганов З.Г. Волновые напряжения в электрических машинах. - М.: Энергия, 1970. - 209 с.
13. Сташко В.И. Диагностика изоляции электродвигателей в сельском хозяйстве на основе использования метода затухающих колебаний в обмотке: Дис ... канд. техн. наук. - Барнаул, 1998. - 134 с.
14. Гутов И.А. Прогнозирование состояния электродвигателей на основе использования многофакторных моделей старения изоляции:

В.И. СТАШКО, И.Б. ГУБИН

Дис. ... канд. техн. наук. – Барнаул, 1997. – 255 с.