

ПРОБЛЕМА КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В РЕАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

О.И. Хомутов, Т.Е. Бондаренко, А.А. Грибанов

Интенсификация технологических процессов неразрывно связана с повышением надежности электрических машин и аппаратов. Наиболее слабыми звеньями этих устройств являются их обмотки, так как со временем электроизоляционные пленки эмальпроводов и пленки пропитывающих лаков деградируют и сильно ухудшают свои электрофизические свойства.

Всякое отклонение реальных от нормированных условий работы изоляции ЭД (высокая влажность окружающего воздуха, наличие в атмосфере агрессивных газов, пыли, вибрации, значительные тепловые и механические нагрузки, некачественное напряжение) ведет к снижению надежности ее работы, интенсивному протеканию процессов старения и износа электроизоляционной системы, вследствие чего происходит снижение срока службы [1 - 10].

Старение электроизоляционных материалов, используемых в электродвигателях, представляет собой сложный физико-химический деградационный процесс. Деградационные процессы включают в себя механизмы теплового, электрического, механического, влажностного и химического старения. Для теплового старения характерно протекание термической и термоокислительной деструкции. Изоляция в процессе теплового старения теряет свои эластические и механические свойства, становится хрупкой, неспособной противостоять механическим воздействиям, создаются условия для хрупкого разрыва, появления и развития трещин. Кроме того, тепловое старение приводит к значительному уменьшению сопротивления изоляции и электрической прочности, снижению адгезии пленок эмальлаков к проводам в системах изоляции электрических машин, ухудшению стойкости изоляции к химически активным средам. Процессами электрического старения в изоляции обмоток ЭД обычно пренебрегают, так как их электроизоляционные конструкции работают в области слабых

электрических полей. В этом случае требуется учитывать воздействие коммутаций, вызывающих значительные электрические нагрузки на изоляцию. Под воздействием механических (вибрации) и термомеханических нагрузок происходит механическое старение изоляции. Термомеханические нагрузки возникают в результате периодического нагрева и охлаждения обмоток. Механические нагрузки являются следствием электродинамических сил, возникающих в машине, неуравновешенности вращающихся частей, магнитного тяжения, центробежных усилий. Под воздействием влаги происходит изменение электрических, физико-механических и химических свойств электроизоляционных материалов в сторону их ухудшения. Большое влияние на интенсивность старения изоляции оказывают колебания температуры окружающего воздуха. Резкие снижения температуры воздуха вызывают состояние точки росы и конденсацию влаги на поверхности, в результате чего происходит увлажнение изоляции и коррозия металлических деталей двигателя даже в условиях нормальной влажности воздуха. Наличие химических активных веществ в воздухе также ускоряет процессы старения изоляции. Особенно пагубное влияние на изоляцию оказывает наличие аммиака в окружающей среде помещения. В процессе длительного пребывания в среде аммиака, сероводорода и углекислого газа происходят химические изменения в полимерной изоляции обмоток. При работе в атмосфере с повышенной пыленностью пыль оседает на обмотку и другие конструктивные элементы электродвигателя, в результате чего снижается теплоотдача, возникает повышенный нагрев. Пыленность атмосферы может вызывать эрозию изоляции из-за ударов абразивных частиц. Данные деградационные процессы протекают одновременно, взаимно стимулируют друг друга.

Учет всех факторов, действующих на изоляцию, и изменение их величин представ-

ПРОБЛЕМА КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В РЕАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ
ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

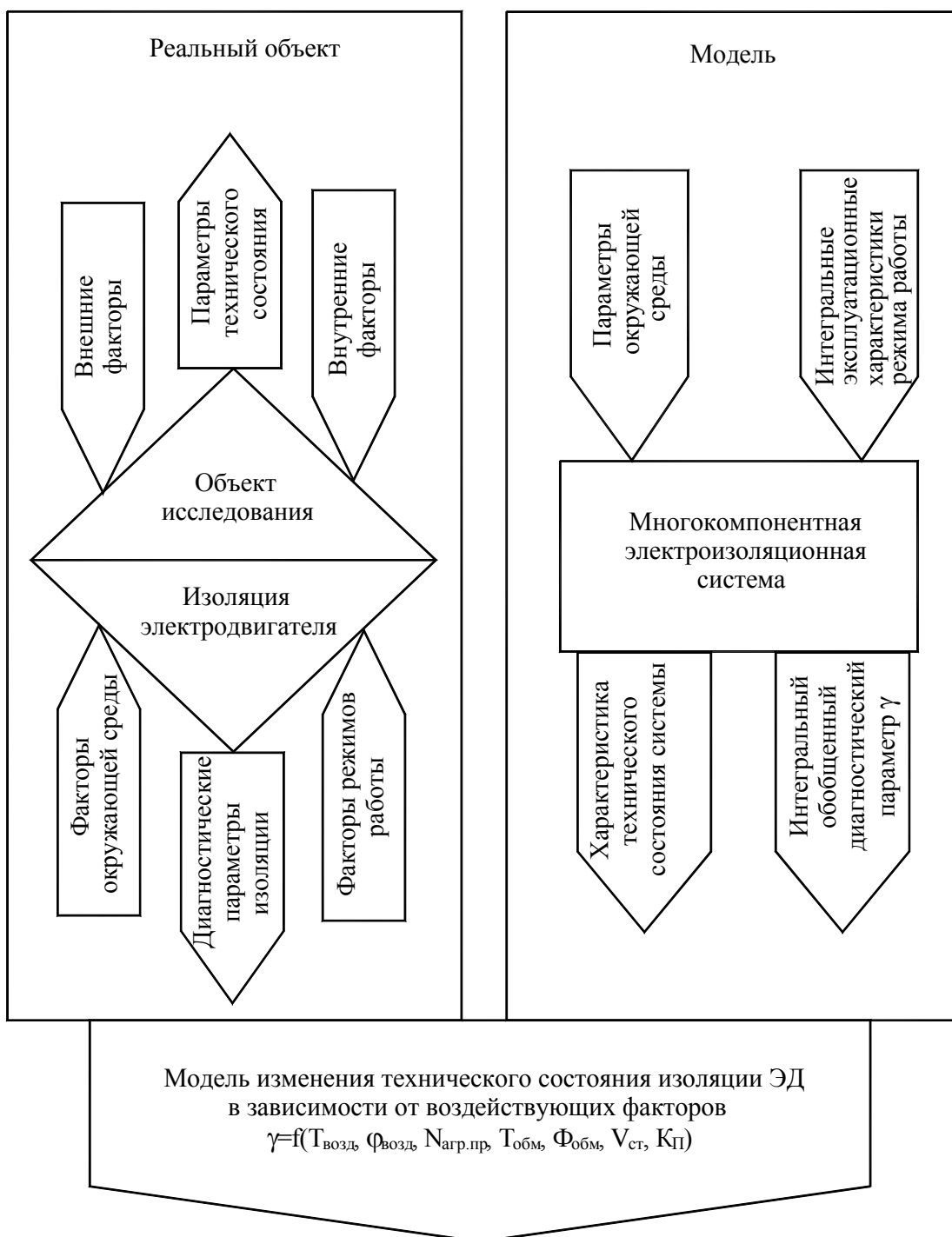


Рис. 1. Описание модели старения изоляции ЭД.

ляет собой очень трудоемкую задачу. В связи с этим имеет смысл выделить из всей совокупности физических параметров только те, которые оказывают существенное (доминирующее) влияние на техническое состояние (надежность) изоляции, и с учетом этих параметров строить модели старения изоляции. Результаты исследований механизмов старения показывают, что условия работы изоляции ЭД можно охарактеризовать следующей совокупностью параметров: температурой окружающей среды, относительной влажностью воздуха, концентрацией агрессивных примесей; температурой в установившемся режиме; вибрационной скоростью статора в установившемся режиме; количеством включений, реверсов и отключений в единицу времени.

При исследовании процесса деградации и старения изоляции ЭД правомерно использовать системный подход, рассматривая ее как единую целостную многокомпонентную систему, а сам процесс старения - как изменение состояния системы.

Для целей прогнозирования технического состояния ЭД процесс старения его изоляции целесообразно представить в виде математической модели изменения состояния системы во времени, входами которой являются воздействующие факторы окружающей среды и режимов работы, а выходами - параметры, с помощью которых можно оценить техническое состояние изоляции [11-13].

Для адекватного описания процесса старения изоляции ЭД должна быть создана модель, которая описывает этот процесс динамически, определяет зависимость изменения состояния объекта от воздействия на него целого комплекса факторов, при этом учитывает случайные воздействия. Всем этим условиям удовлетворяют динамические стохастические модели [13]. Структурная схема данной модели представлена на рис. 1.

Идентификация модели состоит в нахождении по входным и выходным параметрам некоторой системы эквивалентной исходной из некоторого заданного класса. Она предполагает, во-первых, использование априорной информации при определении структуры модели и, во-вторых, обработку данных измерений для получения необходимой апостериорной информации об исследуемой системе.

Для целей прогнозирования состояния изоляции ЭД процесс ее старения целесообразно представить в виде математической модели изменения состояния системы во

времени, вход которой описывается характеристиками воздействующих факторов окружающей среды и режимов работы, а выход - параметрами состояния изоляции обмоток ЭД. При этом входные параметры модели можно представить в виде параметров окружающей среды и эксплуатационных интегральных характеристик режима работы ЭД, которые вычисляются на основе учета процесса изменения соответствующих параметров воздействующих факторов и их предельно допустимых значений и характеризуют суммарную дозу воздействия факторов за время эксплуатации, а выходной параметр модели - интегрального обобщенного диагностического параметра.

Входные параметры математической модели старения изоляции должны удовлетворять следующим требованиям: описывать условия окружающей среды; охарактеризовать суммарную дозу воздействий факторов режима работы ЭД за определенный промежуток времени и вычисляться на основе учета процесса изменения соответствующих параметров воздействующих факторов и их предельно допустимых значений; быть представленными в виде временных рядов; наборы входных параметров модели должны представлять комплексно процесс старения изоляции ЭД, при этом учитывать существенные воздействующие факторы, отражая преобладающее влияние того или иного механизма разрушения. Выделение из всей совокупности воздействующих факторов только существенных приводит к структурному упрощению модели и удобному ее применению в дальнейшем на практике.

Условия окружающей среды описываются параметрами микроклимата: температурой окружающей среды $T_{возд}$, °С; относительной влажностью окружающего воздуха $\omega_{возд}$, %; концентрацией агрессивных примесей $N_{агр.пр.}$, мг/м³ и пыли $N_{пыли}$, мг/м³. Данные параметры окружающей среды являются непрерывно изменяющимися величинами. В математической модели старения изоляции ЭД они представлены в виде временных рядов среднемесячных значений.

Среднемесячные значения температуры и относительной влажности воздуха образуют временной ряд, имеющий периодический характер и ограниченный определенными верхним и нижним значениями. Учет воздействия на изоляцию агрессивных сред и пыли в модели производится путем выделения нескольких уровней концентрации агрессивных

**ПРОБЛЕМА КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В РЕАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ
ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ**

веществ и пыли. Средние значения концентраций аммиака, сероводорода, углекислого газа и пыли определяют уровень влияния этих веществ на старение изоляции ЭД.

В математической модели старения изоляции ЭД должны учитываться следующие основные параметры режима работы: температура обмотки статора $T_{обм1}$, °С и вибрационная скорость статора V_{cm} , мм/с в рабочем установившемся режиме, частота пусков $K.п.$, 1/час, время работы t_p , час/сутки и простоя $t_{пр}$, час/сутки, время эксплуатации ЭД T , сутки. Указанные параметры описывают особенности режимов работы ЭД.

Для количественной оценки воздействия факторов режима работы ЭД на изоляцию его обмоток, а также учета времени этого воздействия, используются следующие интегральные эксплуатационные характеристики (ИЭХ) двигателя: тепловая ИЭХ $T_{обм}$, влажностная ИЭХ $\Phi_{обм}$, вибрационная ИЭХ $V_{ст}$, коммутационная ИЭХ $K.п.$

Для ЭД, работающих с перегрузками, требуется учитывать процесс теплового старения изоляции. В этом случае предложена интегральная эксплуатационная тепловая характеристика ЭД:

$$T_{обм1} = \begin{cases} 0, \text{ при } T_{обм} \leq T_{доп} \\ \sum_{i=1}^{t_p} \int_0^{t_p} (T_{обм}(t) - T_{доп}) dt \approx \sum_{i=1}^T (T_{обм} - T_{доп}) \cdot t_p, \text{ при } T_{обм} > T_{доп} \end{cases}, (1)$$

где $T_{обм1}$ - интегральная эксплуатационная тепловая характеристика ЭД, °С·час;

$T_{обм}$ - температура обмотки в рабочем установившемся режиме, °С;

$T_{доп}$ - максимально допустимая температура для соответствующего класса изоляции обмотки, °С;

t_p - время работы ЭД в установившемся режиме с данной температурой $T_{обм}$, час/сутки;

T - время эксплуатации ЭД, сутки.

Данная характеристика оценивает воздействие, в результате которого происходит интенсивное тепловое старение изоляции ЭД, при этом учитывается рабочая температура обмотки и предельно допустимое ее значение для данного класса изоляции, а также время этого воздействия.

При работе ЭД в условиях повышенной влажности и особенно в случае их работы с недогрузкой, необходимо учитывать воздействие влаги на изоляцию ЭД, в результате которого происходят процессы гидролитической деструкции изоляционных материалов и возникают термомеханические нагрузки при периодических циклах сушки и увлажнения

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 1 2002

изоляции соответственно во время пуска и останова двигателя. В этом случае важна количественная характеристика увлажнения изоляции - интегральная эксплуатационная влажностная характеристика ЭД:

$$\Phi_{обм} = \begin{cases} 0, \text{ при } \varphi_{возд} \leq \varphi_{доп} \\ \sum_{i=1}^{t_{пр}} \int_0^{t_{пр}} (\Phi_{обм}(t) - \varphi_{доп}) dt \approx \sum_{i=1}^T (\varphi_{возд} - \varphi_{доп}) \cdot t_{пр}, \text{ при } \varphi_{возд} > \varphi_{доп} \end{cases}, (2)$$

где $\Phi_{обм}$ - интегральная влажностная характеристика ЭД, %·час;

$\omega_{возд}$ - средняя относительная влажность воздуха, %;

$\omega_{доп}$ - допустимая относительная влажность воздуха, %;

$t_{пр}$ - время пребывания изоляции при влажности $\omega_{возд}$, час/сутки;

T - время увлажнения, сутки.

Эта интегральная эксплуатационная характеристика позволяет оценить степень влияния влажностного старения на состояние изоляции, при этом учитываются относительная влажность воздуха, предельно допустимое ее значение и время воздействия.

Воздействие механических нагрузок на изоляцию при вибрации, возникающей при работе двигателя, предлагается обобщенно оценивать интегральной эксплуатационной вибрационной характеристикой, принцип построения которой аналогичен предыдущим интегральным эксплуатационным характеристикам:

$$V_{cm} = \begin{cases} 0, \text{ при } v_{cm} \leq v_{доп} \\ \sum_{i=1}^{t_p} \int_0^{t_p} (v_{cm}(t) - v_{доп}) dt \approx \sum_{i=1}^T (v_{cm} - v_{доп}) \cdot t_p, \text{ при } v_{cm} > v_{доп} \end{cases}, (3)$$

где V_{cm} - интегральная вибрационная характеристика, мм/с·час;

v_{cm} - вибрационная скорость в установившемся режиме, мм/с;

$v_{доп}$ - допустимый уровень вибрационной скорости, мм/с;

t_p - время работы ЭД в установившемся режиме с данной вибрационной скоростью v_{cm} , час/сутки;

T - время эксплуатации ЭД, сутки.

Интегральная вибрационная характеристика V_{cm} определяет степень влияния вибрации на изоляцию, при которой с течением времени от возникающих механических нагрузок в ней накапливаются повреждения, и учитывает время воздействия данного фактора. Она показывает, что при значениях вибрационной скорости, превышающей предельно допустимое значение, процессы механического старения изоляции обмоток протекают в значительной мере интенсивнее.

Воздействие на изоляцию переходных режимов: перенапряжений, электродинамических и механических нагрузок, возникающих в результате коммутаций, - описывается коммутационной ИЭХ $K_{п}$, которая представляет собой суммарное количество коммутаций за время эксплуатации:

$$K_{п} = 2 \cdot \sum_{i=1}^T K_n + \sum_{i=1}^T K_p, \quad (4)$$

где $K_{п}$ - суммарное количество пусков на данный момент времени T , раз;

K_n - среднее количество пусков в сутки, 1/сутки;

K_p - среднее количество реверсов в сутки, 1/сутки;

T - время, сутки.

Построенные временные ряды по данным входным параметрам модели имеют приближенный периодический характер с линейным ростом, определяемым спецификой и сезонностью использования изоляционной конструкции.

Таким образом, все воздействующие факторы окружающей среды и режимов работы ЭД, влияющие на старение изоляции, можно представить в виде временных рядов с определенным интервалом осреднения по времени. Каждому временному отсчету изменения параметра состояния изоляции ЭД можно поставить в соответствие количественную оценку воздействующего фактора - значения интегральных характеристик режима работы двигателя: $T_{обм}$, $\Phi_{обм}$, $V_{см}$, $K_{п}$, и значения параметров окружающей среды: $T_{возд}$, $\omega_{возд}$, $N_{агр.пр}$, $N_{пыли}$.

Установление взаимосвязи между ИЭХ и интегральным обобщенным диагностическим параметром γ является важнейшим условием комплексной оценки изменения физико-химических свойств электроизоляционной системы в ходе эксплуатации электрооборудования. Эта задача может быть решена на основе проведения комплекса экспериментальных исследований, заключающихся в физическом моделировании воздействия условий эксплуатации на изоляционную конструкцию ЭД. Поскольку процесс старения изоляции является сравнительно длительным, то для получения исковых результатов использовались методы проведения ускоренных лабораторных испытаний. При этом программа проведения экспериментов была построена на основе сжатия временных рядов с коэффициентом ускорения $k=15$.

Статистическая обработка результатов проведенных экспериментов путем комплекс-

ного анализа полученных временных рядов изменения интегрального обобщенного диагностического параметра в сочетании с временными рядами ИЭХ. В результате получено следующее уравнение динамической стохастической модели:

$$\gamma = \lambda_1 \cdot \gamma_{t-1} + b_{01} \cdot T_{возд} + b_{02} \cdot \Phi_{обм} + b_{03} \cdot K_{п} + b_{04} \cdot V_{см} + c_0 \cdot e^{c_1 t} + d_1 \cdot w(t), \quad (5)$$

где λ_1 , b_{01} , b_{02} , b_{03} , b_{04} , c_0 , c_1 , d_1 - коэффициенты динамической стохастической модели;

γ_{t-1} - значение интегрального обобщенного диагностического параметра, полученного в ходе предыдущей оценки технического состояния;

$w(t)$ - функция тренда модели старения изоляции.

Достоинством полученной модели является возможность определения степени изменения физико-химических свойств изоляционной конструкции за любой промежуток времени при изменении значений воздействующих параметров в пределах этого промежутка. Параметр γ выражен в относительных единицах, что делает удобным его использование для различного электрооборудования.

Таким образом, проведенные исследования позволили получить зависимость, при использовании которой для прогнозирования технического состояния изоляционной конструкции становится возможным своевременное выявление негативных тенденций его изменения и принятие мер по предотвращению внезапных отказов электрооборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пропиточные лаки класса нагревостойкости В, F, H / Под ред. Б.М. Брейтман - М.: ОВНИИЭМ (Информэлектро), 1976. - 66 с.
2. Глушков А.М. Исследование условий работы электрооборудования в сельскохозяйственных предприятиях Приморского края // Научные труды. - Челябинск: ЧИМЭСХ, 1973. - Вып. 83. - Ч.2. - С. 5-10.
3. Большаков А.А. Исследование влияния среды животноводческих ферм на основные характеристики изоляции электродвигателей: Дис. канд. техн. наук. - Челябинск, 1968. - 186 с.
4. Большаков А.А., Дергач В.И. Условия работы электродвигателей в животноводстве // Вопросы эксплуатации и повышения эксплуатационной надежности электрооборудования. - Челябинск, 1976. - С. 17-19.
5. Чекрыгин В.С. Исследование эксплуатационной надежности асинхронных двигателей в ус-

ПРОБЛЕМА КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В РЕАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ
ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

- ловиях животноводческих помещений: Дис. ... канд. техн. наук. – М., 1972. – 173 с.
6. Сырых Н.Н. Повышение надежности электрифицированных технологических процессов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1985. - №8. – С. 46-50.
 7. Граматович Э.К. Исследование влияния режимов работы электродвигателей животноводческих ферм на срок их службы: Дис. ... канд. техн. наук. – Челябинск, 1975. – 222 с.
 8. Керпелева И.Е., Казимир А.П., Немчинов К.М. Результаты экспериментального изучения работы электродвигателей в условиях животноводческих помещений // Научные труды НИМТИМЭСХ Северо-Запада. – 1970. – Т. 6. – С. 42-46.
 9. Сырых Н.Н. Эксплуатация сельских электроустановок. – М.: Агропромиздат, 1986. – 255 с.
 10. Бернштейн Л.М. Изоляция машин общего назначения. - М.: Энергоиздат, 1981. – 376 с.
 11. Кулаковский В.Б. Работа изоляции в генераторах: Возникновение и методы выявления дефектов. - М.: Энергоиздат, 1981. – 256 с.
 12. Современные методы идентификации систем / П. Эйкхофф, А. Ванечек, Е. Савараги и др.: Пер. с англ.; Под ред. П. Эйкхоффа. – М.: Мир, 1983. – 400 с.
 13. Кашьяп Р.Л., Рао А.П. Построение динамических стохастических моделей по экспериментальным данным. – М.: Наука, 1983. – 384 с.
 14. Хомутов О.И., Сташко В.И. Контроль состояния изоляции обмоток электродвигателей // Повышение надежности электрооборудования и электроснабжения в сельском хозяйстве: Сб. научн. тр. / ЧИМЭСХ. – Челябинск, 1989. – С. 9-13.