

МНОГОФАКТОРНОЕ ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН НА РЕЗУЛЬТАТ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ИХ ПОЛИМЕРНОЙ ИЗОЛЯЦИИ

С.О. Хомутов

В соответствии с методикой диагностики состояния полимерной изоляции электрических машин (ЭМ) на основе характера волновых затухающих колебаний (ВЗК) в обмотках для получения достоверного результата о степени деградации изоляционных материалов необходимо осуществить сравнение измеренного значения диагностического параметра с его эталонным значением для конкретного типа ЭМ известной мощности. Однако на практике такое сравнение осуществить не удастся в силу отсутствия у потребителя сведений об эталонных значениях диагностического параметра для различных типов ЭМ. Данные эталонные значения могут быть получены путем установления зависимостей значений параметров ВЗК в обмотке от значений ряда факторов, определяющих конструкцию ЭМ.

На первоначальном этапе решения поставленной задачи необходимо выявить оптимальное число параметров, описывающих конструкцию ЭМ. Существует два возможных пути решения данного вопроса: расчетный и экспериментальный. Однако результаты, получаемые при проведении экспериментов, хотя и имеют высокую достоверность, но их достижение сопряжено со значительными затратами времени и материалов. Поэтому данный способ целесообразно использовать при проведении специальных исследований.

Наиболее просто решить рассматриваемый вопрос можно расчетным путем получения искоемых данных, а именно путем использования метода экспертных оценок, суть которого заключается в ранжировании экспертами исследуемых параметров. В данном случае, экспертам предлагалось присвоить каждому параметру ранг, который мог принять два значения: параметр оказывает влияние на исследуемый процесс или не оказывает. В результате анализа полученных от экспертов данных автором были выделены две группы параметров конструкции ЭМ: параметры первой группы влияют на формирование волнового затухающего процесса при диагностике, а параметры второй группы ока-

зывают несущественное влияние, либо оно отсутствует вовсе.

Следующим этапом исследования является построение простой и удобной в использовании математической модели волновых затухающих колебаний. В данном случае, в качестве диагностического параметра будет выступать выходной параметр математической модели волновых затухающих процессов, протекающих в обмотке ЭМ при подаче на ее вход прямоугольного импульса напряжения.

Реализация вышеназванных этапов исследования предполагает использование схемы замещения, которая может быть составлена для любого типа обмотки. При этом делается допущение, согласно которому распределенные параметры обмотки ЭМ заменяются сосредоточенными. Кроме того, построение математической модели ВЗК в обмотке ЭМ производится расчетом переходного процесса, возникающего при подаче на обмотку единичного импульса, с помощью классического метода. Расчет переходного процесса выполняется отдельно для выходных параметров генератора и для параметров схемы замещения обмотки ЭМ.

Рассмотрим более подробно формирование схемы замещения обмоток статоров ЭМ, зависящей, в общем случае, от конструкции электрических машин. В данном случае при моделировании ВЗК в обмотках ЭМ были приняты следующие допущения:

- полузакрытый паз сложной овальной формы заменяется круглым закрытым пазом равной площади;
- случайное расположение проводников в пазу при всыпной обмотке заменяется регулярным;
- материалы проводников и сердечников принимаются однородными.

Как известно, междувитковое пространство обмотки ЭМ состоит из многослойного диэлектрика: два слоя покровной эмали, один слой пропиточного лака и различных примесей.

Диэлектрическая проницаемость сложных диэлектриков, представляющих собой

смесь нескольких компонентов с разными диэлектрическими проницаемостями, может быть в первом приближении определена на основании логарифмического закона смешения, который в общем случае применим для расчета самых различных свойств.

После получения данных по диэлектрической проницаемости лака, автором был сформирован комплекс математических выражений для определения диэлектрической проницаемости междувиткового пространства. Для этого были приняты следующие допущения:

- каждый изоляционный слой имеет однородную структуру без посторонних включений (посторонних включений из проводящих или полупроводящих материалов);

- эмаль проводов не имеет механических повреждений и располагается равномерным слоем по всей поверхности провода.

Выполненные расчеты для различных эмалей и пропиточных лаков показывают, что величина диэлектрической проницаемости междувитковой изоляции зависит, главным образом, от толщины вышеуказанных изоляционных покрытий.

Помимо диэлектрической проницаемости, важным свойством изоляции является ее удельная проводимость. Так как междувитковая изоляция состоит из многослойного диэлектрика, для определения удельной проводимости воспользуемся логарифмическим законом смешения для параллельного включения компонентов:

$$\rho_{\text{виз}} = \frac{1}{\frac{\theta_{\text{лак}}}{\rho_{\text{лак}}} + \frac{\theta_{\text{эм}}}{\rho_{\text{эм}}} + \sum_{i=1}^n \frac{\theta_i}{\rho_i}}, \quad (1)$$

где $\rho_{\text{эм}}$, $\rho_{\text{лак}}$, ρ_i – удельные объемные сопротивления эмали, лака и i -го компонента изоляционной конструкции;

$\rho_{\text{виз}}$ – удельное электрическое сопротивление междувитковой изоляции.

Зависимость удельного сопротивления междувитковой изоляции от толщины лака и эмали позволяет прийти к следующему выводу: величина удельного сопротивления в большей степени обусловлена меньшим значением удельного сопротивления компонента, входящего в изоляционную систему.

Для нормальной работы электрической машины большое значение имеет сохранение целостности изоляционной конструкции. Нарушение ее целостности в обмотке ЭМ может иметь место между витками, расстоянием между которыми минимально. Поэтому автором были подробно рассмотрены свой-

ства параметров витков, лежащих в непосредственной близости друг от друга.

В первую очередь, в результате анализа расположения проводников в пазу ЭМ, в схему замещения катушки были включены междувитковое сопротивление и междувитковая емкость, характерные для пары проводников с минимальным расстоянием между ними:

$$R_{\text{е}} = \frac{\rho \cdot d_{\text{е}}}{S}, \quad (2)$$

$$C_{\text{е}} = \frac{\varepsilon_{\text{е}} \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d_{\text{е}}}, \quad (3)$$

где ρ – удельное сопротивление междувитковой среды;

$d_{\text{е}}$ – расстояние между витками;

S – условная площадь поверхности витков;

$\varepsilon_{\text{е}}$ – диэлектрическая проницаемость междувитковой среды;

ε_0 – электрическая постоянная.

При анализе данных междувитковых параметров, входящих в схему, было установлено, что междувитковое сопротивление $R_{\text{е}}$ и междувитковая емкость $C_{\text{е}}$ зависят, в первую очередь, от расстояния между проводниками при одинаковых марках провода, длине витка и неизменном составе междувитковой среды. Причем, на изменение значений $R_{\text{е}}$ и $C_{\text{е}}$ величина данного параметра оказывает диаметрально противоположное воздействие: $R_{\text{е}}$ увеличивается, а $C_{\text{е}}$ – уменьшается, и наоборот.

Зависимость междувиткового сопротивления от толщины прослойки лака и марок лаков показывает, что с увеличением расстояния между проводниками наблюдается возрастание величины сопротивления:

$$X_{C_{\text{е}}} = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_{\text{е}}}, \quad (4)$$

поэтому даже при удалении проводников друг от друга на незначительное расстояние сопротивление рассматриваемой цепи увеличится в несколько раз. Следовательно, для проводников, находящихся на большем расстоянии друг от друга, характерна меньшая междувитковая емкость и большее междувитковое сопротивление, чем для близлежащих проводников. Условно можно принять, что сопротивление цепи утечки тока через междувитковую изоляцию при значительном расстоянии между проводниками равно бесконечности. Это означает, что при данном условии междувитковые сопротивление и ем-

кость образуют разрыв цепи и должны быть исключены из схемы замещения.

Таким образом, при разработке схемы замещения фазы, необходимо учесть следующие обстоятельства:

– в электрических машинах достаточно учитывать взаимные влияния в пределах каждого паза, содержащего две секции двухслойной обмотки. Последние могут относиться к разным фазам или к разным участкам одной фазной обмотки;

– каждая секция имеет взаимные связи не только в пределах данного паза, но и вне его, например, в лобовых частях обмотки. Но так как связь очень слабая, учетом ее влияния можно пренебречь.

Возвращаясь к вопросу рассмотрения свойств параметров витков, лежащих в непосредственной близости друг от друга, произведем расчет активного сопротивления междувитковой изоляции.

На первом этапе производится расчет удельного объемного сопротивления междувитковой изоляции. На втором – расчет активного сопротивления междувитковой изоляции. Это можно сделать двумя способами:

– через постоянную саморазряда τ_0

$$\tau_0 = R_{uz} \cdot C = \rho_{uz} \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{uz},$$

то есть
$$R_{uz} = \frac{\rho_{uz} \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{uz}}{C}; \quad (5)$$

– по определению удельного объемного сопротивления ρ

$$\rho = \frac{R \cdot S}{\delta},$$

где S – площадь электрода, m^2 ;

δ – толщина образца, м.

Таким образом,
$$R_{uz} = \frac{\rho_{uz} \cdot \delta_{uz}}{S}. \quad (6)$$

Исходя из того, что для расчета по второму способу необходимо знание лишь конструктивных параметров строения обмотки статора, а в первом требуется дополнительный расчет междувитковой емкости, выбираем второй способ расчета.

Применительно к рассматриваемому случаю формула (6) примет следующий вид:

$$R_e = \frac{\rho_{euz} \cdot \sum_{i=1}^g \delta_{ei}}{2 \cdot \pi \cdot r_1 \cdot l \cdot \psi}, \quad (7)$$

где δ_{ei} – толщина i -го слоя междувитковой изоляции;

r_1 – радиус провода без изоляции;

g – количество слоев междувитковой изоляции;

ψ – поправочный коэффициент, учитывающий площадь соприкосновения проводников между собой и со стенками паза.

При вычислении значений междувиткового сопротивления автором было установлено, что у электрических машин мощностью 0,55 – 55 кВт они изменяются в пределах от 32 до 63 кОм.

В свою очередь, электрическая емкость междувитковой изоляции является одним из основных параметров, характеризующих состояние изоляции и влияющих на волновой затухающий процесс в обмотке при диагностике. Поэтому вопрос об определении значений этого параметра актуален.

Для нахождения значений междувитковой емкости воспользуемся упрощенной физической моделью междувиткового пространства, представляющей собой два параллельных проводника цилиндрической формы. Проводники будем предполагать бесконечно длинными. Емкость определим между их отрезками длиной l , что в нашем случае будет приравняться к длине витка обмотки статора соответствующей ЭМ.

Опуская промежуточные вычисления, приведем конечную формулу расчета C_e для двух проводов определенной длины:

$$C_e = \frac{\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{uz} \cdot l}{\ln \left[\frac{(\delta_{uz} + 2 \cdot r) - r}{r} \right]} = \frac{\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{uz} \cdot l}{\ln \left[\frac{\delta_{uz} + r}{r} \right]}, \quad (8)$$

то есть емкость зависит только от конфигурации тел, их размеров, расстояния между телами и электрических свойств диэлектрика (величины диэлектрической проницаемости).

Кроме того, экспериментальные исследования, проведенные при участии автора, также показали, что междувитковая емкость зависит от расстояния между витками, которое, в свою очередь, зависит от диаметра провода:

$$\delta_1 = \varpi \cdot d', \quad (9)$$

где d' – диаметр провода с эмалью, м;

ϖ – коэффициент междувиткового пространства.

Используя предложенную автором методику расчета параметров физической модели изоляции, можно найти значение междувитковой емкости конкретной электроизоляционной системы (ЭИС), являющееся эталонным. То есть становится возможным определение верхнего значения основного параметра (C_e), характеризующего свойство междувитковой изоляции в начале ее жизненного цикла, соответствующее наивысшей прочности изоляции.

В практике предприятий, занимающихся ремонтом электрических машин, нередко случаи, когда при перематке обмоток статоров вместо проводов, предусмотренных ТУ для данного типа ЭМ, используются иные провода. При этом значение такого параметра, как индуктивность, будет отличаться от табличного. Для оценки влияния таких изменений конструкции обмотки на волновой затухающий процесс необходимо иметь методику определения индуктивности.

Индуктивность обмотки электрической машины может быть рассчитана по формуле:

$$L_{об} = \frac{X_{11}}{\omega} = \frac{X_{11}}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (10)$$

В общей теории электрических машин принято различать главное потокоцепление и потокоцепление рассеяния обмотки статора. Первое создается главным потоком Φ , проходящим через воздушные зазоры и сцепляющимся с обеими обмотками машины. Второе создается полем рассеяния, сцепляющимся только со своей обмоткой. В соответствии с этим, для статора ЭМ:

$$X_{11} = X_{1r} + X_1, \quad (11)$$

где X_{11}, X_{1r} – полное и главное индуктивные сопротивления;

X_1 – индуктивное сопротивление рассеяния.

Главное сопротивление обмотки статора равно индуктивному сопротивлению взаимной индукции, приведенному к обмотке статора:

$$X_{1r} = X_{12} = \frac{U_1 - I_\mu \cdot X_1}{I_\mu}, \quad (12)$$

где U_1 – номинальное фазное напряжение, В;
 I_μ – намагничивающий ток, А.

В свою очередь, намагничивающий ток рассчитывается по формуле:

$$I_\mu = \frac{p \cdot F_\Sigma}{0,9 \cdot m_1 \cdot w_1 \cdot k_{об1}}, \quad (13)$$

где p – число пар полюсов;

F_Σ – суммарное магнитное напряжение магнитной цепи машины (на пару полюсов), А;

m_1 – число параллельных проводников обмотки статора;

w_1 – число витков в фазе обмотки;

$k_{об1}$ – обмоточный коэффициент.

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора ЭМ определяется по формуле:

$$X_1 = 15,8 \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{w_1}{100} \right)^2 \cdot \frac{l_\delta}{p \cdot q} \cdot (\lambda_\pi + \lambda_\pi + \lambda_\pi) \quad (14)$$

где l_δ – длина воздушного зазора, м;

λ_π – коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния;

λ_π – коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния;

λ_π – коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния.

q – число пазов на фазу.

Входящий в формулу коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния λ_π определяется в зависимости от конфигурации пазов по формулам:

$$\lambda_\pi = \frac{h_3}{3 \cdot b} \cdot k_\beta + \left(0,785 - \frac{b_w}{2 \cdot b} + \frac{h_2}{b} + \frac{h_w}{b_w} \right) \cdot k'_\beta; \quad (15)$$

$$\lambda_\pi = \frac{h_3}{3 \cdot b} \cdot k_\beta + \left(\frac{h_2}{b} + \frac{3 \cdot h_1}{b + 2 \cdot b_w} + \frac{h_w}{b_w} \right) \cdot k'_\beta. \quad (16)$$

Формула (15) справедлива при конфигурации паза, приведенной на рисунке 1а, а формула (16) – на рисунке 1б. В этих формулах значения коэффициентов k_β, k'_β определяются в зависимости от шага обмотки.

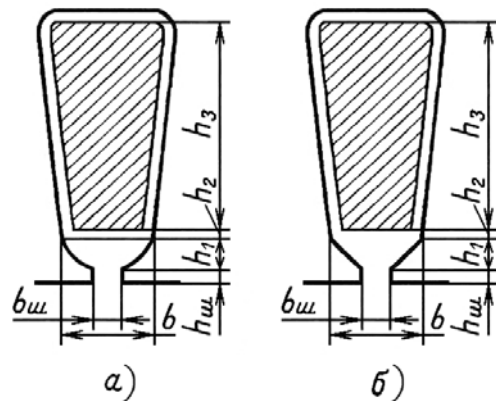


Рисунок 1 – Конфигурации пазов статора ЭМ.

Для определения коэффициента магнитной проводимости лобового рассеяния λ_π целесообразно использовать формулу:

$$\lambda_\pi = 0,34 \cdot \frac{q}{l_\delta} \cdot (l_\pi - 0,64 \cdot \beta \cdot \tau), \quad (17)$$

где l_π – длина лобовой части катушки, м;

$\beta = 1$ – относительное укорочение шага обмотки;

τ – полюсное деление, м.

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния λ_π определяется по формуле:

$$\lambda_d = \frac{t_1}{12 \cdot \delta \cdot k_\delta} \xi, \quad (18)$$

где t_1 – зубцовое деление статора, м;

ξ – коэффициент, зависящий от числа q , укорочения шага обмотки и размерных соотношений зубцовых зон и воздушного зазора.

При изменении конструкции обмотки в ходе капитального ремонта ее активное сопротивление может быть рассчитано по следующему выражению:

$$R_{обм} = \frac{\rho \cdot l_{ср} \cdot n_{\phi}}{s_{эл} \cdot n_{эл} \cdot a}, \quad (19)$$

где ρ – удельное объемное сопротивление проводника, Ом·м;

$l_{ср}$ – длина витка, м;

n_{ϕ} – количество витков в обмотке, шт;

$s_{эл}$ – сечение эффективного проводника,

м;

$n_{эл}$ – число элементарных проводников в одном эффективном, шт;

a – число параллельных ветвей обмотки, шт.

Определить величину сопротивления изоляции обмотки относительно корпуса можно путем рассмотрения многослойной диэлектрической конструкции. Допустим, что в пазу вместо большого числа проводников лежит один эквивалентный проводник. Интересующая нас изоляция обмотки ЭМ относительно корпуса состоит из многослойного диэлектрика: слоя покровной эмали, слоя пропиточного лака и нескольких слоев волокнистых электроизоляционных материалов (лакоткани, текстолита, гетинакса).

При рассмотрении характеристик изоляции обмотки относительно корпуса примем следующие допущения:

– каждый изоляционный слой имеет однородную структуру без посторонних включений;

– эмаль проводов не имеет механических повреждений и располагается равномерным слоем по всей поверхности провода.

К рассмотрению примем упрощенную модель многослойной изоляции, где толщина лака $\delta_{лак}$ меняется в пределах от 0 до 0,7 мм, а толщины остальных компонентов изоляционной конструкции равны нормируемым для данного типа ЭМ.

Таким образом, толщина корпусной изоляции определяется следующим образом:

$$\delta_{куз} = \delta_{лак} + \delta_{эм} + \sum_{i=1}^n \delta_{ki}. \quad (20)$$

Находим объемные концентрации элементов изоляционной системы:

$$\theta_{лак} = \frac{\delta_{лак}}{\delta_{куз}}; \theta_{эм} = \frac{\delta_{эм}}{\delta_{куз}}; \theta_{ki} = \frac{\delta_{ki}}{\delta_{куз}}. \quad (21)$$

Затем определяем диэлектрическую проницаемость корпусной изоляции:

$$\varepsilon_{г.куз} = \frac{1}{\frac{\theta_{лак}}{\varepsilon_{г.лак}} + \frac{\theta_{эм}}{\varepsilon_{г.эм}} + \sum_{i=1}^n \frac{\theta_{ki}}{\varepsilon_{gi}}}, \quad (22)$$

где $\varepsilon_{г.лак}$ – диэлектрическая проницаемость пропиточного лака;

$\varepsilon_{г.эм}$ – диэлектрическая проницаемость эмали провода;

ε_{gi} – диэлектрическая проницаемость i -го слоя корпусной изоляции.

Так как корпусная изоляция состоит из многослойного диэлектрика, воспользуемся логарифмическим законом смешения для последовательного включения компонентов:

$$\rho_{куз} = \frac{1}{\frac{\theta_{лак}}{\rho_{лак}} + \frac{\theta_{эм}}{\rho_{эм}} + \sum_{i=1}^n \frac{\theta_{ki}}{\rho_{ki}}}. \quad (23)$$

Сопротивление изоляции относительно корпуса можно определить по выражению:

$$R_k = \frac{\rho_{куз} \cdot \sum_{i=1}^f \delta_{ki}}{4 \cdot \pi \cdot r_1 \cdot n \cdot l_{паз} \cdot \psi}, \quad (24)$$

где n – количество проводников, прилегающих к стенкам паза;

$l_{паз}$ – длина сердечника статора.

Расчет значений корпусного сопротивления показал, что для исследуемых ЭМ они составляют 320-1000 МОм.

Емкость относительно корпуса одной катушки обмотки можно приближенно подсчитать, принимая во внимание допущения, использованные при расчете сопротивления изоляции относительно корпуса.

Радиус эквивалентного проводника может быть определен по следующему выражению:

$$r_{эв} = r \sqrt{s}, \quad (25)$$

где s – количество проводников в пазу.

Тогда емкость относительно корпуса одной катушки обмотки, принимая во внимание допущения, может быть определена:

$$C_{кат} = \frac{\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{куз} \cdot 2 \cdot l_{паз}}{\ln \frac{\delta_{лак} + \delta_{эм} + \sum_{i=1}^m \delta_{ki} + r_{эв}}{r_{эв}}}. \quad (26)$$

Емкость одной фазы относительно корпуса подсчитывается, как:

$$C_{\phi} = k_2 \frac{n}{6} C_{кат}, \quad (27)$$

где n – число пазов статора;

$n/6$ – количество катушек в фазе;

k_2 – коэффициент, учитывающий поправку на краевой эффект: $k_2 = 1,0$ – для машин открытого исполнения и $k_2 = 1,05-1,07$ – для закрытых машин.

В общем случае, используя теоретический подход к описанию состояния ЭИС и учитывая ее реальную неоднородность, дефектность изоляции можно представить в виде коэффициента пористости $K_{пор}$.

В результате преобразования выражения (8) получим:

$$C_\theta = \frac{\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot V_{uz} \cdot \varepsilon_{возд} \cdot \varepsilon_{эм} \cdot \varepsilon_{лак} \cdot I}{(V_{пор} \cdot \varepsilon_{эм} \cdot \varepsilon_{лак} + V_{эм} \cdot \varepsilon_{возд} \cdot \varepsilon_{лак} + V_{лак} \cdot \varepsilon_{возд} \cdot \varepsilon_{эм})} \times \frac{1}{\ln \left[\frac{\delta_{uz} + r}{r} \right]} \quad (28)$$

Из уравнения (28) выразим объем пор:

$$V_{пор} = \frac{\pi \cdot V_{uz} \cdot \varepsilon_{возд} \cdot \varepsilon_{эм} \cdot \varepsilon_{лак} \cdot I \cdot \varepsilon_0}{\ln \left[\frac{\delta_{uz} + r}{r} \right] \cdot C_\theta \cdot \varepsilon_{эм} \cdot \varepsilon_{лак}} - \frac{V_{эм} \cdot \varepsilon_{возд}}{\varepsilon_{эм}} - \frac{V_{лак} \cdot \varepsilon_{возд}}{\varepsilon_{лак}} \quad (29)$$

Тогда количественной характеристикой дефектности изоляционных материалов будем считать коэффициент пористости, определяемый по выражению:

$$K_{пор} = \frac{V_{пор}}{V_{uz}} = \frac{\pi \cdot \varepsilon_{возд} \cdot \varepsilon_{эм} \cdot \varepsilon_{лак} \cdot I \cdot \varepsilon_0}{\ln \left[\frac{\delta_{uz} + r}{r} \right] \cdot C_\theta \cdot \varepsilon_{эм} \cdot \varepsilon_{лак}} - \frac{V_{эм} \cdot \varepsilon_{возд}}{V_{uz} \cdot \varepsilon_{эм}} - \frac{V_{лак} \cdot \varepsilon_{возд}}{V_{uz} \cdot \varepsilon_{лак}} \quad (30)$$

Выражение (30) отражает дефектность сухой изоляции, поры которой заполнены чистым воздухом. В общем случае увлажнения или загрязнения пор в материалах многослойной изоляционной конструкции выражение (30) примет вид:

$$K_{пор} = \frac{V_{пор}}{V_{uz}} = \frac{\pi \cdot \varepsilon_{зс} \cdot \varepsilon_{эм} \cdot \varepsilon_{лак} \cdot I \cdot \varepsilon_0}{\ln \left[\frac{\delta_{uz} + r}{r} \right] \cdot C_\theta \cdot \varepsilon_{эм} \cdot \varepsilon_{лак}} - \sum_{i=1}^k \frac{V_i \cdot \varepsilon_{зс}}{V_{uz} \cdot \varepsilon_i} \quad (31)$$

где $\varepsilon_{зс}$ – диэлектрическая проницаемость заполняющей поры смеси;

ε_i – диэлектрическая проницаемость i -го слоя изоляции;

k – количество слоев изоляционных материалов.

Междувитковую емкость при наличии загрязняющих примесей можно определить:

$$C_\theta = \frac{\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot V_{uz} \cdot \prod_{i=1}^k \varepsilon_i \cdot I}{\sum_{i=1}^k \left[V_i \cdot \left(\prod_{j=1, j \neq i}^k \varepsilon_j \right) \right] \cdot \ln \left[\frac{\delta_{uz} + r}{r} \right]} \quad (32)$$

Междувитковое сопротивление при наличии примесей в обмотке рассчитывается по формуле:

$$R_\theta = \frac{(V_{лак} \cdot \rho_{лак} + V_{эм} \cdot \rho_{эм} + \sum_{i=1}^n V_{зсi} \cdot \rho_{зсi})}{2 \cdot V_{uz} \cdot \pi \cdot r_1 \cdot l \cdot \psi} \times \sum_{i=1}^g \delta_{\theta i} \quad (33)$$

где $V_{зсi}$ – объем i -го компонента загрязняющей смеси;

$\rho_{зсi}$ – удельное сопротивление i -го компонента загрязняющей смеси.

Подводя итог вышесказанному необходимо отметить, что проведенные исследования позволили получить ряд дополнительных выражений, учитывающих воздействие концентрации веществ, содержащихся в окружающей среде, на значения параметров схемы замещения.

Однако кроме химических факторов, при выполнении соответствующих расчетов следует также учитывать воздействие ряда физических факторов. При этом будем полагать, что в течение диагностирования значения параметров схемы замещения не изменяются, то есть время диагностирования мало по сравнению со временем изменения физико-химических свойств изоляционной конструкции.

В заданных ограничениях основным физическим фактором, значение которого подлежит учету, является температура обмотки. Получение теоретическим путем зависимости как параметров схемы замещения, так и диагностического параметра от температуры представляет собой очень трудоемкую задачу. Поэтому температурная зависимость диагностического параметра Π_{uz} была обнаружена в ходе экспериментальных исследований.

Таким образом, на основании вышесказанного, результатом выполненных исследований является найденная возможность определения эталонных значений диагностического параметра Π_{uz} для каждого типа ЭМ. Расчет проводится с использованием описанной выше модели волновых затухающих колебаний, а исходными данными при этом являются значения параметров схемы замещения, найденные выше.

В настоящее время для прогнозирования технического состояния изоляции ЭМ используется разработанная при участии автора динамическая стохастическая модель, которая имеет следующий вид

$$P_{uz} = \lambda_1 P_{ust-1} + b_{01} T_{\text{возд}} + b_{02} \Phi_{\text{обм}} + b_{03} K_n + b_{04} V_{cm} + c_0 e^{c_1 t} + d_1 w, \quad (34)$$

где $\lambda_1, b_{01}, b_{02}, b_{03}, b_{04}, c_0, c_1, d_1$ – коэффициенты разностного стохастического уравнения;

$T_{\text{возд}}, \Phi_{\text{обм}}, K_n, V_{cm}$ – интегральные характеристики условий эксплуатации. Значения факторов в данном уравнении заданы в кодированной форме.

Подстановка полученных эталонных значений диагностического параметра в динамическую стохастическую модель позволит получить номинальный срок службы электроизоляционной системы конкретного типа ЭМ в заданных условиях эксплуатации.

Опуская промежуточные рассуждения, приведем основные выводы по результатам исследований: установление количественных взаимосвязей между параметрами схемы замещения обмотки и рядом параметров конструкции ЭМ возможно лишь в неявном виде; связь между параметрами ВЗК и параметрами схемы замещения может быть установлена с помощью предложенной математической модели ВЗК в обмотке с учетом конструктивных параметров электроизоляционной системы (ЭИС) ЭМ; диэлектрическая проницаемость ЭИС напрямую зависит от диэлектрических проницаемостей входящих в нее компонентов и их объемного соотношения; междувитковая емкость обратно пропорциональна значению коэффициента пористости обмотки и зависит от свойств материала, заполняющего поры; значения диагностического параметра увеличиваются с ростом мощности и числа полюсов ЭМ.

Таким образом, установление зависимости влияния значений конструктивных параметров ЭМ на значения элементов схемы замещения обмоток позволит получать конкретные величины диагностического параметра, формируемого, как уже указывалось ранее, волновым затухающим процессом, для различных серий новых или капитально отремонтированных электрических машин. Кроме того, подстановка полученных эталонных значений диагностического параметра в динамическую стохастическую модель позволит получить номинальный срок службы ЭИС конкретного типа ЭМ в заданных условиях эксплуатации.

На сегодняшний день остается актуальной задача моделирования процессов старения изоляции при создании моделей прогнозирования для определения надежности ЭМ. Однако во многих случаях для физических систем не удастся найти адекватного математического описания с последующим применением его на практике. Одним из методов, позволяющим это сделать, является информационно-логический анализ.

Как статистика, так и теория информации имеет дело с разнообразием элементов некоторой совокупности, но их подход к задачам совершенно различен. Статистика рассматривает разнообразие как зло и пытается выяснить, что же можно все-таки утверждать или сделать, несмотря на разнообразие. Теория информации рассматривает разнообразие как положительное явление, без которого такие операции, как отбор, связь, спецификация, были бы не возможны; эта теория стремится выяснить, что можно достичь благодаря некоторой степени разнообразия.

Разнообразие свойственно каждому природному явлению. Если обозначить некоторую функцию через A , то каждое значение функции можно выразить через a_i , т.е. ранжировать. Не зная закономерности изменения A , мы можем принять, что появление a_i есть случайное событие; тогда частоты появления каждого ранга $A = a_i$ есть оценка условной вероятности $p(a_i)$.

Наше суждение о появлении того или иного значения функции A в какой-то мере неопределенно. Величину этой неопределенности можно оценить количественно. Она обозначается как $H(A)$ для явления A или $H(B)$ для явления, фактора, параметра B и определяется по формуле:

$$H(A) = -\sum p(a_i) \cdot \log_2 p(a_i). \quad (35)$$

Если изучается зависимость явления A от параметра (фактора) B , необходимо учесть также и неопределенность фактора B , которая находится таким же образом по условной вероятности появления каждого ранга $p(b_j)$. Обозначение b_j показывает, что число рангов B может быть произвольным и отличаться от числа рангов появления A . В этом случае, вероятность рангов a_i в каждом ранге обозначается через $p(a_i / b_j)$. Для каждого b_j можно рассчитать неопределенность:

$$H(A / b_j) = -\sum p(a_i / b_j) \cdot \log_2 p(a_i / b_j). \quad (36)$$

Если между явлениями A и B существует зависимость, то $H(A) \neq H(A / b_j)$. Разность

этих величин служит мерой того, насколько наше суждение об A при b_j становится более определенным, чем при знании только распределения A . Эта мера обозначается как $J(A/b_j)$ и называется информацией об A , содержащейся в b_j . Эта информация не всегда положительна. Количество информации $T(A, B)$, поступающей от параметра B к явлению A , оценивается следующим образом:

$$T(A, B) = \sum p(b_j) \cdot J(A/b_j). \quad (37)$$

Значение $T(A, B)$ зависит не только от связи между A и B , но и от величин их неопределенностей. Чем больше неопределенность факторов, тем большее количество информации передается к явлению. Для устранения влияния величины H вводится коэффициент эффективности передачи информации фактором B к явлению A :

$$K(A, B) = \frac{T(A, B)}{H(B)}. \quad (38)$$

При обработке экспериментальных данных необходимо определить: энтропию $H(B)$, энтропию $H(A)$, количество информации T , коэффициент эффективности передачи информации фактором B к явлению A (K).

Таким образом определяются все факторы, влияющие на некоторую функцию A , а именно, необходимо для каждого фактора создать канал связи и найти коэффициент эффективности передачи информации; чем K больше, тем более сильное влияние оказывает данный фактор. Однако, поскольку сами факторы могут также быть связаны между собой, то необходимо выявить размеры информации, поступающей по совместным каналам связи. Для этого строят каналы связи к изученному явлению от двух и большего числа параметров (обычно достаточно двух).

Вычленение прямого влияния параметра на изучаемое явление основывается на сопоставлении частных информаций, передаваемых каждым параметром, с величиной информации, передаваемой ими совместно. Могут возникнуть три случая:

– $T(A, B) + T(A, C) = T(A; B, C)$ - информация, передаваемая от параметра с наименьшим значением функции T , косвенная и есть результат зависимости этого параметра от второго. Знак «;» отделяет значение от параметров;

– $T(A, B) + T(A, C) > T(A; B, C)$ - каждый из факторов в рамках анализируемой трехкомпонентной системы имеет относительно явления прямую информацию, однако неко-

торая часть ее имеет косвенный характер и есть продукт их взаимной связи;

– $T(A, B) + T(A, C) < T(A; B, C)$ - каждый из параметров содержит прямую информацию, косвенная информация или полностью отсутствует или незначительна.

На основе информационного анализа удается получить следующие результаты:

– построить оптимальную «классификацию» явлений и параметров для данных исследований;

– выявить область значений параметра, где явление устойчиво;

– определить меру зависимости явления от каждого состояния параметра, от параметра в целом и от совокупности состояний параметров;

– исключить параметры, связанные с явлением косвенно, в основном в результате взаимной связи с некоторым третьим явлением;

– на основании выявленных связей создается возможность для научной постановки опытов по изучению данного явления.

Информационный анализ является лишь первым шагом в обработке материала. Но установление формы логической зависимости явления от рассматриваемого набора параметров разрешается с применением функций многозначной логики.

Для выявления зависимости между рядом параметров и явлением можно пользоваться некоторыми функциями m -значной логики. Необходимо при помощи элементарных логических функций (конъюнкции, нелинейного произведения, дизъюнкции) построить различные гипотезы. При этом большое значение имеет не только логический характер связи между аргументами, но и положение их относительно друг друга. Эти положения определяются по значению коэффициента эффективности передачи информации K . Затем по направлению информативности к максимальным или минимальным ранговым значениям можно предположить вид связи между параметрами.

Заключительным этапом будет сопоставление теоретических и наблюдаемых распределений частот различных значений. Из этого можно выбрать наиболее подходящую гипотезу.

Рассмотренная выше модель может быть применена для определения вероятности безотказной работы межвитковой изоляции ЭМ. Также с ее помощью можно будет количественно определить степень влияния различных факторов на вероятность безот-

МНОГОФАКТОРНОЕ ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН НА РЕЗУЛЬТАТ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ИХ ПОЛИМЕРНОЙ ИЗОЛЯЦИИ

казной работы, с последующими рекомендациями по выбору пропиточного состава межвитковой изоляции, а также методов сушки и пр. Результатом работы может быть оценка эффективности различных мероприятий по повышению надежности работы ЭМ. При этом если функция – это вероятность безот-

казной работы, то факторами будут являться: внешние – относительная влажность воздуха, температура окружающей среды, концентрация вредных примесей и др., внутренними – число включений в сутки; время работы; характер нагрузки, а также параметры конструкции ЭМ.