

МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА И ИЗОЛЯЦИИ СТАТОРА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ, ПОДВЕРГШЕЙСЯ СТАРЕНИЮ

Г.В. Суханкин, Н.Т. Герцен

Известно, что модель объекта, процесса или явления представляет собой математические закономерности, с помощью которых описаны основные характеристики моделируемого объекта, процесса или явления. Цель создания модели – упрощение реального объекта или явления, выделение главного, не отвлекаясь на детали. В настоящей статье выделена на передний план и исследуется связь затухания акустической волны и степени старения изоляции электрической машины (ЭМ). Такое упрощение представляется правомерным, так как достаточно хорошо согласуется с экспериментальными данными.

Ключевые слова: модель, изоляция, акустическая волна, электрическая машина, коэффициент передачи.

Полнота и достоверность получаемой информации о состоянии изоляции достигается диагностическими напряжениями и деформациями в звуковом и ультразвуковом частотном диапазоне, который зависит от её типа, конструкции и степени старения. Существующие механические методы контроля изоляции не могут обеспечить испытания материалов на таких частотах. Электрические методы могут быть использованы в указанном спектре частот, однако контроль физико-механических показателей в этом случае может осуществлён только косвенно. Поэтому наиболее эффективным, с этой точки зрения, является акустический метод исследования материала.

В настоящей статье построена модель взаимодействия акустического сигнала и полимерной изоляции, подвергшейся негативным факторам при эксплуатации ЭМ. Построению такой модели предшествовал анализ существующих моделей, процессов напряжений и деформаций, происходящих в полимерных телах, позволивший сделать следующие выводы:

1. Существующие модели, представленные в виде отдельных механических объектов (пружин и демпферов), носят упрощенный характер, описывающий одно время релаксации. Реальные же полимеры характеризуются спектром времён релаксации.

2. Существующие модели не описывают влияние внешней среды на вязкоупругие свойства полимерного тела.

Для решения указанных проблем разработана модель, которая описывает взаимодействие изоляции и акустической волны таким образом, что изменяющиеся параметры

зондирующего акустического сигнала адекватно отражают структурные изменения исследуемой среды.

Особенностью изоляции ЭМ в процессе её изготовления, эксплуатации или хранения является следующее:

1. Наличие неоднородностей.

2. Наличие упругих и вязких структур.

3. При изготовлении, эксплуатации или хранении (старении) изоляции свойства её упругих E и вязких η структур изменяются.

В рассматриваемой модели предполагается, что с течением времени на изоляцию ЭМ действуют: температура X_1 , влажность X_2 , виброскорость X_3 , изменяя упругость и вязкость (изоляция старится), влияя на параметры акустической волны, распространяющейся в ней. Таким параметром в модели рассматривается коэффициент α затухания акустической волны. При прохождении тока через проводники обмотки статора ЭМ, в силу их магнитного взаимодействия, возникают их микроперемещения, вызывая акустическую эмиссию в изоляции. В модели рассматриваются два проводника обмотки и соответствующая волна, порождённая их взаимодействием.

Достоверность информации о состоянии изоляции достигается соответствующей длиной λ зондирующей акустической волны, которая создаёт нормальные и тангенциальные напряжения в ней. Пусть x – геометрический размер изоляции, d – геометрические размеры неоднородности (воздушный зазор, дефекты и. т. д.), t – время старения изоляции ЭМ. Действие X_1 , X_2 , X_3 , с течением времени t можно рассматривать как изменение коэффициента передачи K акустического сигнала

МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА И ИЗОЛЯЦИИ СТАТОРА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ, ПОДВЕРГШЕЙСЯ СТАРЕНИЮ

до и после прохождения изоляции (рисунок 1, 2.).

Если изоляцию в рассматриваемой модели рассматривать как изотропное тело, то длина волны зондирующего сигнала должна превышать размеры неоднородностей в ней, т.е. $\lambda > d$. С другой стороны, если длина волны сопоставима или меньше x , то изоляцию можно рассматривать как длинный объект, состоящий из равномерно распределённых элементов (рисунок 2) с одинаковыми акустическими параметрами.

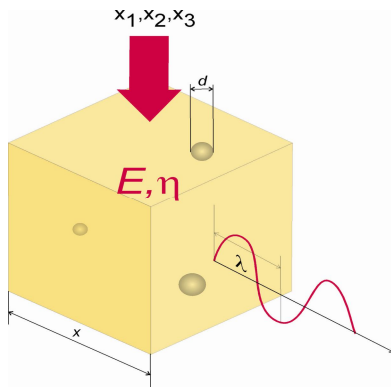
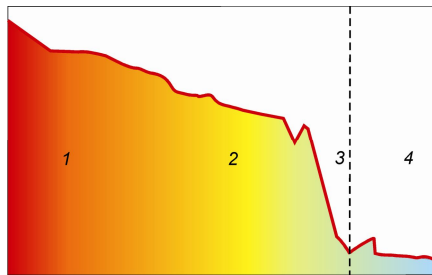


Рисунок 1 – Исходные предпосылки для построения модели

К



Область исследования модели

$\lambda/d \approx 1$ $1/\lambda$

Рисунок 2 – Коэффициент передачи акустической волны, прошедшей изоляцию ЭМ: K – коэффициент передачи, λ – длина волны, x – геометрические размеры изоляции, d – геометрические размеры неоднородности, 1 – зона длинноволновой части зондирующего акустического сигнала, 2 – зона, где длина волны приближается к размеру неоднородности, 3 – зона, где длина волны сопоставима с размером неоднородности, 4 – область высокого затухания сигнала

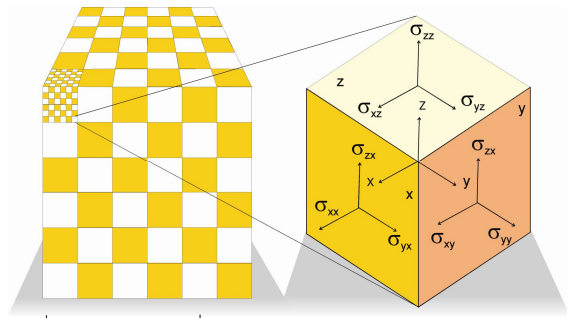


Рисунок 3 – Структурная модель и элементарная ячейка (ЭЯ) изоляции: нормальные напряжения – σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} , тангенциальные напряжения – σ_{xy} и σ_{yx} и σ_{zx} σ_{yz} и σ_{zx} σ_{yx} и σ_{xz} , x – геометрические размеры изоляции, В этом тензоре компонент напряжения выражается первым индексом, а вторым – ориентация площадки, на которую эта сила действует. Источник синусоидального акустического напряжения находится внутри этого куба и может создаваться, например, магнитным взаимодействием проводников статора ЭМ

В элементарном объёме действуют два типа напряжений: нормальные – σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} и тангенциальные σ_{xy} и σ_{yx} и σ_{zx} σ_{yz} и σ_{zx} σ_{yx} и σ_{xz} . Напряжённое состояние полимерной изоляции характеризуется тензором третьего ранга – таблицей из девяти чисел компонентов [1].

$$\sigma_{ik} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix}.$$

В этом тензоре компонент напряжения выражается первым индексом, а вторым – ориентация площадки, на которую эта сила действует. Если полимерная изоляция находится в состоянии равновесия, то нормальные компоненты, действующие по осям в прямом и обратном направлении равны. Следовательно, $\sigma_{xy} = \sigma_{yx}$, $\sigma_{zy} = \sigma_{yz}$, $\sigma_{xz} = \sigma_{zx}$. В этом случае тензор является симметричным. Соответствующим образом выглядят компоненты тензора деформации:

$$\varepsilon_{ik} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{pmatrix}.$$

Приведенный тензор является симметричным, а диагональные компоненты определяются соотношениями

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x}; \quad \varepsilon_{yy} = \frac{\partial u_y}{\partial y}; \quad \varepsilon_{zz} = \frac{\partial u_z}{\partial z},$$

где u_x , u_y и u_z – компоненты вектора смещения, представляют собой удлинения ребер куба dx , dy и dz (рисунок 4).

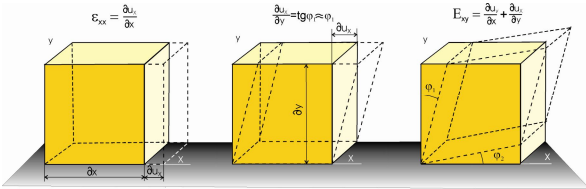


Рисунок 4 – Компоненты тензора деформации в изоляции

Компоненты

$$\varepsilon_{xy} = \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) / 2; \quad \varepsilon_{xz} = \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) / 2;$$

$$\varepsilon_{yz} = \left(\frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right) / 2$$

представляют собой одновременный сдвиг двух граней куба (рисунок 4). Так как модель полимерной изоляции представлена в виде изотропного тела, свойства которого не зависят от направления, то для такого тела связь между компонентами T_{ik} ε_{ik} при i не равно k выражается законом Гука

$$\sigma_{ii} = \lambda \varepsilon + 2\mu \varepsilon_{ii}; \quad \sigma_{ik} = 2\mu \varepsilon_{ik}. \quad (1)$$

Величина $\varepsilon = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}$ обозначает изменение единицы объема; λ и μ – упругие постоянные, называемые константами Ламе. Вместо них можно использовать две другие константы упругости, например модуль нормальной упругости E и модуль сдвига G или E и коэффициент Пуассона ν .

Волновое уравнение для полимерной изоляции записывается путем использования второго закона Ньютона к элементарному объему $dx dy dz$ твердого тела. Подставляя вместо напряжения деформации из уравнения (1), получаем уравнения распространения волн в изоляции:

$$p \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + \mu \nabla^2 u_x;$$

$$p \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} + \mu \nabla^2 u_y;$$

$$p \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} + \mu \nabla^2 u_z, \quad (2)$$

где $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ оператор Лапласа.

Рассмотрим волновой процесс в полимерной изоляции на основе волнового уравнения (2), перейдя от смещения u к амплитуде волны A . Так как модель изотропна, то

функция φ зависит от одной координаты, например, x . Следовательно

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = c^2 \nabla^2 \varphi,$$

$$\nabla^2 \varphi = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2},$$

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2}.$$

Решение подобного уравнения в частных производных имеет вид

$$\varphi = \varphi_1(x - ct) + \varphi_2(x + ct),$$

где φ_1 – функция волны, распространяющаяся в прямом направлении, φ_2 – функция волны, распространяющаяся в обратном направлении. Для упрощения решения задачи опустим слагаемое с φ_2 .

В рассматриваемой модели распространяющаяся волна является гармонической, тогда

$$\varphi = A \cos\left(\frac{\omega}{c}(x - ct)\right), \quad (3)$$

где $\omega = 2\pi f$ – круговая частота, f – частота колебаний, $\left(\frac{\omega}{c}(x - ct)\right)$ – фаза. С учётом волнового числа $k = \omega/c = 2\pi/\lambda$ уравнение (3) приобретает вид

$$\varphi = A \cos(kx - \omega t).$$

В экспоненциальной форме:

$$\dot{\varphi} = A e^{i(kx - \omega t)}. \quad (4)$$

Физический смысл имеет действительная часть комплексной величины $\dot{\varphi}$, т.е. $\varphi = \text{Re } \dot{\varphi}$. В полимерной среде необходимо учитывать затухание акустической волны, связанной с внутренним трением, неидеальным упругим свойством и другими эффектами. Коэффициент затухания складывается из коэффициентов поглощения α и коэффициента рассеяния δ . При поглощении звуковая энергия переходит в тепловую, а при рассеянии энергия остаётся звуковой, но уходит от направления волны в результате многократных отражений от неоднородностей структуры среды. Для упрощения решения задачи будем учитывать только поглощение звука введением мнимой части в волновое число $k = 2\pi/\lambda + i\alpha$. Таким образом, (5) связывает амплитуду волны, расстояние, которая она прошла в изоляции и коэффициент поглощения, что является основой построения модели [2].

$$A(x) = A_0 e^{-\alpha x} \quad (5)$$

МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА И ИЗОЛЯЦИИ СТАТОРА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ, ПОДВЕРГШЕЙСЯ СТАРЕНИЮ

В качестве основы модели разработана элементарная ячейка, параметры которой соответствуют состоянию микроструктур изоляции, подвергнутых негативным воздействиям при эксплуатации или хранении ЭМ. Источником акустического напряжения, действующего на ЭЯ является магнитное взаимодействие проводников обмотки ЭМ, через которые пропускается диагностический ток (рисунок 5).

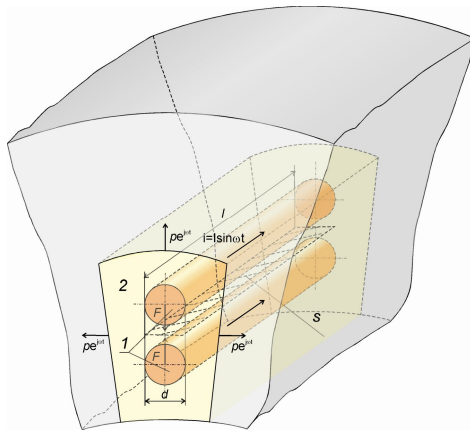


Рисунок 5 – Модель паза обмотки ЭМ: 1 – проводники обмотки, 2 – изоляция, F – сила взаимодействия проводников обмотки, S – площадь, на которую эта сила действует, i – диагностический синусоидальный ток в проводнике, $pe^{i\omega t}$ – акустическое напряжение, создаваемое взаимодействием проводников

Рассмотрим ЭЯ изоляции (рисунок 6). Упругие свойства изоляции представлены идеальным упругим элементом E , потери в изоляции – вязкими элементами η_1 и η_2 , причём η_1 характеризует фазу отверждения изоляции в процессе ремонта или изготовления, η_2 – потери за счёт неидеальности упругости E . Таким образом, представленная модель может быть выражена следующими уравнениями:

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2; \quad \varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2; \quad \sigma_1 = \eta_1 d\varepsilon_1/dt; \quad \sigma_2 = \eta_2 d\varepsilon/dt; \quad \sigma_1 = \eta_1 d\varepsilon/dt; \quad (6)$$

Для упрощения расчетов волновых процессов, происходящих в изоляции необходимо использовать известные в литературе электромеханические аналогии, перейдя от механических величин к электрическим (таблица 1):

Из уравнений (6) при постоянном акустическом напряжении выводится следующая модель:

$$\sigma = (\eta_1 \eta_2 \frac{d^2 \varepsilon}{dt^2} + E(\eta_1 + \eta_2) \frac{d\varepsilon}{dt}) / E.$$

**Таблица 1
Электромеханические аналогии**

Механические величины		Акустические величины	Электрические величины
1 система	2 система	1 система	
Сила σ	Скорость деформации $d\varepsilon/dt$	Звуковое давление P	Напряжение U
Скорость деформации $d\varepsilon/dt$	Сила σ	Объёмная скорость S_v	Ток i
Масса m	Упругость $1/C$	Акустическая масса $m_a = \rho l/S$	Индуктивность L
Упругость $1/C$	Масса m	Упругость $1/C = 1/V\rho c^2$	Ёмкость C
Вязкость η	Вязкость η^{-1}	Акустическое сопротивление η	Сопротивление R

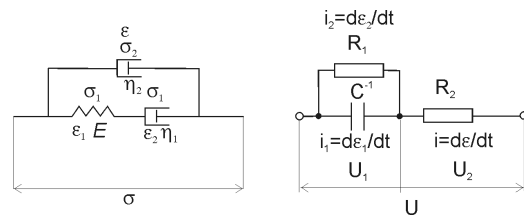


Рисунок 6 – Элементарная ячейка изоляции в виде электромеханических аналогий (1 система)

Полное решение при $\varepsilon(t=0)=0$ и $d\varepsilon/dt(t=0)=C$ для элементарной ячейки изоляции

$$\varepsilon(t) = \frac{\eta_1 \eta_2}{E} \left(C - \frac{\sigma}{\eta_1 + \eta_2} \right) \left(1 - \exp\left(\frac{-E(\eta_1 + \eta_2)}{\eta_1 \eta_2} t \right) \right) + \frac{\sigma}{\eta_1 + \eta_2} t.$$

Так как модель изоляции носит изотропный характер и имеет несколько спектров релаксации (n элементарных ячеек), то в общем виде распространение продольной звуковой волны:

$$\frac{k^4}{c^2} \sum_{j=1}^n \frac{i\omega\chi_j}{1+i\omega\tau_{3j}} \left(\frac{b^2}{c^2} + \frac{1}{\rho c^2} \frac{4}{3} \sum_{j=1}^n \frac{i\omega\tau_{1j} E_j}{1+i\omega\tau_{1j}} + \frac{1}{\rho c^2} \sum_{j=1}^n \frac{i\omega\tau_{2j} K_{\eta j}}{1+i\omega\tau_{2j}} \right) + k^2 \left(1 + \frac{4}{3\rho c^2} \sum_{j=1}^n \frac{i\omega\tau_{1j} E_j}{1+i\omega\tau_{1j}} + \frac{4}{\rho c^2} \sum_{j=1}^n \frac{i\omega\tau_{2j} K_{\eta j}}{1+i\omega\tau_{2j}} + \frac{1}{\rho c^2} \frac{i\omega\chi_j \rho}{1+i\omega\tau_{3j}} \right) + 1 = 0,$$

где χ – коэффициент теплопроводности, τ – время релаксации.

Объектом исследования в вышеприведенной формуле является показатель E , который определяется по измеряемому показателю поглощения α и является действительной частью волнового коэффициента $\alpha = \text{Re } k$.

Используя электромеханические аналогии можно перейти к эквивалентной электрической схеме изоляции ЭМ, представленной на рисунке 7.

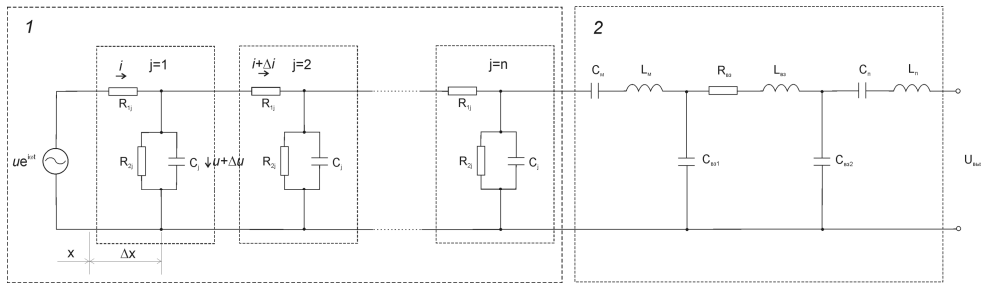


Рисунок 7 – Эквивалентная электрическая схема модели изоляции (1) и измерительного устройства (2): j – элементарная ячейка изоляции, x – геометрические размеры ячейки изоляции, C_j – ёмкость ЭЯ изоляции (в процессе старения уменьшается), R_{1j} – сопротивление ЭЯ изоляции (в процессе изготовления R_{1j} – растёт, при старении – незначительно может изменяться), R_{2j} – потери в ЭЯ за счёт неидеальности упругих характеристик ячейки изоляции, $(\Delta u, \Delta i)$ – приращения на участках Δx , индексы m и p относятся к обкладкам, а $vz, vz1$ и $vz2$ – к воздушным зазорам измерительного устройства

Уравнения для приращений напряжений и тока на элементе длины Δx запишутся так:

$$\left. \begin{aligned} -\Delta u &= R_{1j} \Delta i; \\ -\Delta i &= \left[\frac{(u + \Delta u)}{R_{2j}} + C_j \frac{\partial(u + \Delta u)}{\partial t} \right] \Delta x. \end{aligned} \right\}$$

Для синусоидального диагностического тока

$$\left. \begin{aligned} -\frac{d\dot{U}}{dx} &= R_{1j} \dot{I}; \\ -\frac{d\dot{I}}{dx} &= (R_{2j} + j\omega C) \dot{U}. \end{aligned} \right\}$$

Таким образом,

$$\left. \begin{aligned} -\frac{d^2 \dot{U}}{dx^2} &= R_{1j} \left(\frac{1}{R_{2j}} + j\omega C \right) \dot{U}; \\ -\frac{d^2 \dot{I}}{dx^2} &= R_{1j} \left(\frac{1}{R_{2j}} + j\omega C \right) \dot{I}. \end{aligned} \right\}$$

Из этой системы

$$\delta = \sqrt{R_{1j} (R_{2j} + j\omega C)} = \alpha + j\beta, \quad (7)$$

что имеет тот же смысл, что и для акустических колебаний.

Коэффициент ослабления для ЭЯ

$$\alpha = \sqrt{0,5 \left(\frac{R_{1j}}{R_{2j}} + \left(R_{1j}^2 \left(\left(\frac{1}{R_{2j}} \right)^2 + \omega^2 C^2 \right) \right) \right)};$$

Таким образом,

$$\delta^2 \dot{U} = \frac{d^2 \dot{U}}{dx^2}.$$

Следовательно, уравнение падающей и отражённой волн

$$\dot{U} = A_1 e^{-\delta x} + A_2 e^{\delta x}. \quad (8)$$

Подставив (7) в (8), получим:

$$\dot{U} = A_1 e^{-\alpha x} e^{-j\beta x} + A_2 e^{\alpha x} e^{j\beta x}.$$

Тогда, значение напряжения в любой точке x эквивалентной модели

$$u(x, t) = \text{Im} \left[\sqrt{2} A_1 e^{-\alpha x} e^{-j\beta x} e^{i\omega t} + \sqrt{2} A_2 e^{\alpha x} e^{j\beta x} e^{i\omega t} \right] = \sqrt{2} |A_1| e^{-\alpha x} \sin(\omega t + \psi_1 - \beta x) + \sqrt{2} |A_2| e^{\alpha x} \sin(\omega t + \psi_2 + \beta x).$$

Приведённая формула является основой исследования эквивалентной модели, представленной на рисунке 6.

Для получения экспериментальных данных разработана соответствующая методика [3].

При контроле образцов изоляции ультразвуком перечень эксплуатационных воздействий на изоляцию электродвигателей определяется воздействием температуры, влаги, вибраций, что соответствует тепловому, влажностному и механическому старению. Для имитации механических воздействий служит установка, включающая в себя вибростенд, пульт управления с контрольно-измерительной аппаратурой и устройства для автоматического поддержания режима работы.

Для имитации климатических воздействий используется камера теплоты и влаги. Камера представляет собой прямоугольный корпус из листовой стали, в котором размещены электронагревательный элемент для создания температуры и ванночка с расположенным под ней электронагревательным элементом для создания требуемой влажности. Блок управления камеры служит для автоматического поддержания заданных параметров температуры и влажности с точностью достаточной для проведения испытаний.

С помощью разработанных технических средств путём испытания образцов пропиточных лаков в камере теплоты и влаги, а

МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА И ИЗОЛЯЦИИ СТАТОРА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ, ПОДВЕРГШЕЙСЯ СТАРЕНИЮ

также на вибростенде при воздействии на них влажности $X_1(0-100\%)$, температуры $X_2(0-200^\circ\text{C})$ и виброскорости $X_3(0-420 \text{ мм/с})$ получены данные по затуханию акустических сигналов, связанные с изменением модулем упругости E и свидетельствующие о степени старения изоляции (рисунки 8,9,10).

Испытания проводились до отказа ЭМ. Согласно ГОСТам 21126-75, 10518-88, 24683-81, 9.083-78, 9.707-81, 9.715-76 использовались планирование и методика проведения испытаний.

При обработке экспериментальных данных формировалась многомерная матрица, в которой столбцы соответствуют результатам регистрации воздействующих факторов, а строки – номеру режима эксперимента.

$$E = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & x_{2m} \\ \dots & \dots & \dots \\ x_{n1} & x_{n2} & x_{nm} \end{pmatrix}, \text{ где } E - \text{ диагностический}$$

признак.

В подобной матрице элемент x_{ij} соответствует значению i наблюдения j фактора. Объектом последующей обработки является стандартизированная безразмерная матрица S , упрощающая расчёты, которая вычисляется следующим образом:

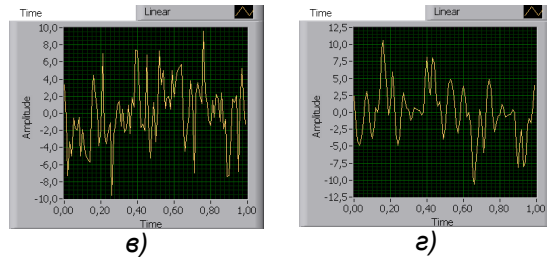
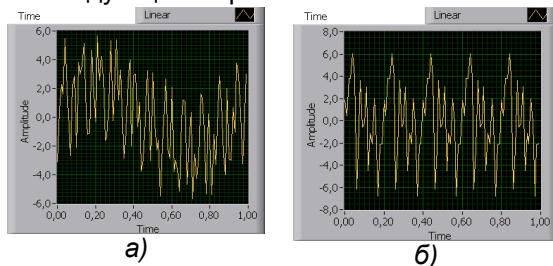


Рисунок 8 – Результаты по старению модели, изображённой на рисунке 6: а) – 100 ч, б) – 300 ч, в) – 500 ч, г) – 900 ч.

$$s_{ij} = \frac{(x_{ij} - \mu_1(x_j))}{\sigma(x_j)}, i = 1, \bar{n}, j = 1, \bar{m},$$

где математическое ожидание

$$\mu_1(x_j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij} \text{ и дисперсия}$$

$$\mu_2(x_j) = \sigma^2(x_j) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \mu_1(x_j))^2.$$

Корреляционный анализ, проводившейся для некоторых типов изоляции по формуле

$$\rho_{lk} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n s_{li} s_{ki}$$

сведен в таблицу 2.

Регрессионный анализ проводился с привлечением метода наименьших квадратов с использованием нелинейных уравнений типа $E = A_0 + A_1/t^2$ $E = A_0 + A_1/t + A_2t^2$. Расчёт коэффициентов регрессии проводился в соответствии с табл. 3.

Коэффициенты регрессии рассчитывались по формулам:

$$A_0 = \frac{\sum_{i=1}^n E_i \sum_{i=1}^n t_i^2 - \sum_{i=1}^n (t_i E_i) \sum_{i=1}^n t_i}{n \sum_{i=1}^n t_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n t_i \right)^2}, A_1 = \frac{n \sum_{i=1}^n t_i E_i - \sum_{i=1}^n t_i \sum_{i=1}^n E_i}{n \sum_{i=1}^n t_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n t_i \right)^2}.$$

Таблица 2

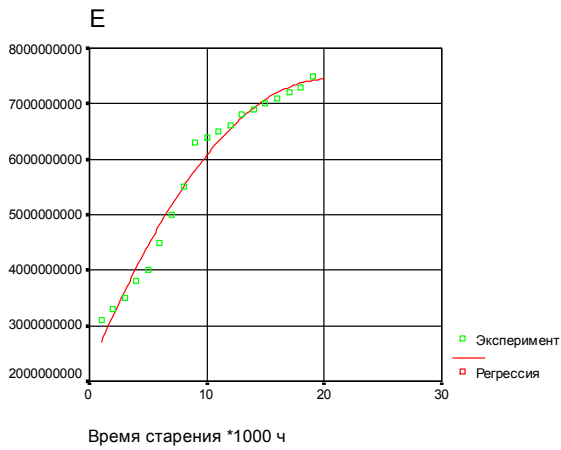
Связь между диагностическим параметром и временем старения для некоторых типов изоляции и их модели старения

Тип изоляции	КП-103	КП-101	КП-18	МЛ-92	КП-34
ρ_{lk}	0,87	0,83	0,77	0,80	0,81
Регрессия вида $E = A_0 + A_1/t^2$	$A_0 = 2,1$ $A_1 = -1,1$	$A_0 = 2,2$ $A_1 = 2,1$	$A_0 = 1,9$ $A_1 = 1,6$	$A_0 = 2,1$ $A_1 = 1,4$	$A_0 = 2,0$ $A_1 = 1,5$
Регрессия вида $E = A_0 + A_1/t + A_2t^2$	$A_0 = 2,2$ $A_1 = 5,1$ $A_2 = -1,0$	$A_0 = 2,1$ $A_1 = 4,7$ $A_2 = -1,1$	$A_0 = 2,3$ $A_1 = 3,3$ $A_2 = -1,4$	$A_0 = 1,9$ $A_1 = 4,7$ $A_2 = -1,5$	$A_0 = 1,8$ $A_1 = 4,6$ $A_2 = -1,5$

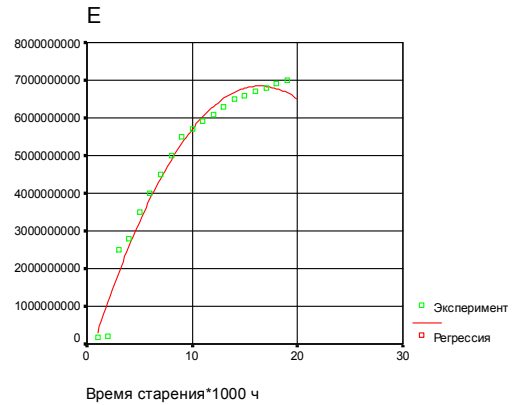
Таблица 3

Расчёт коэффициентов регрессии модели теплового старения изоляции

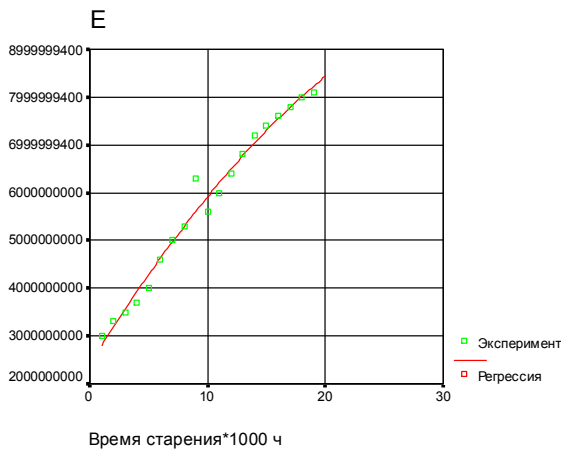
N эксл.	t	E	$t1=1/t^2$	$t1^2$	$t1E$
i	t_i	E_i	$t1_i=1/t_i^2$	$t1_i^2$	$t1_i E_i$
.....
....
n	t_n	E_n	$t1_n=1/t_n^2$	$t1_n^2$	$t1_n E_n$
		ΣE	$\Sigma t1$	$\Sigma t1^2$	$\Sigma t1E$



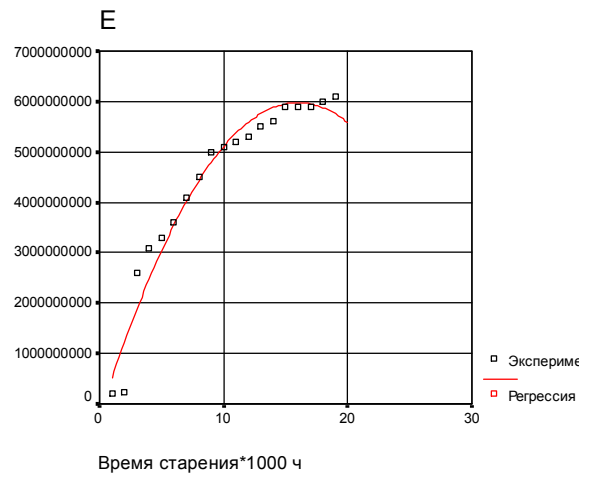
а)



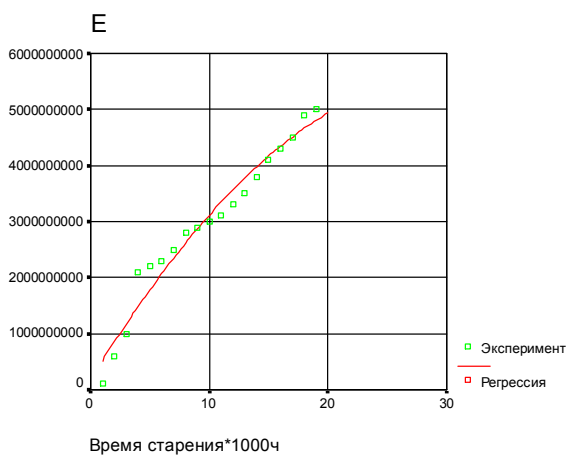
а)



б)



в)



г)

Рисунок 9 – Экспериментальные данные зависимости модуля упругости от времени теплового старения пропиточных материалов, измеренного при 20° С: а) – КП-103, б) – КП-101, в) – КП-18, г) – МЛ-92, д) – КП-34

МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА И ИЗОЛЯЦИИ СТАТОРА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ, ПОДВЕРГШЕЙСЯ СТАРЕНИЮ

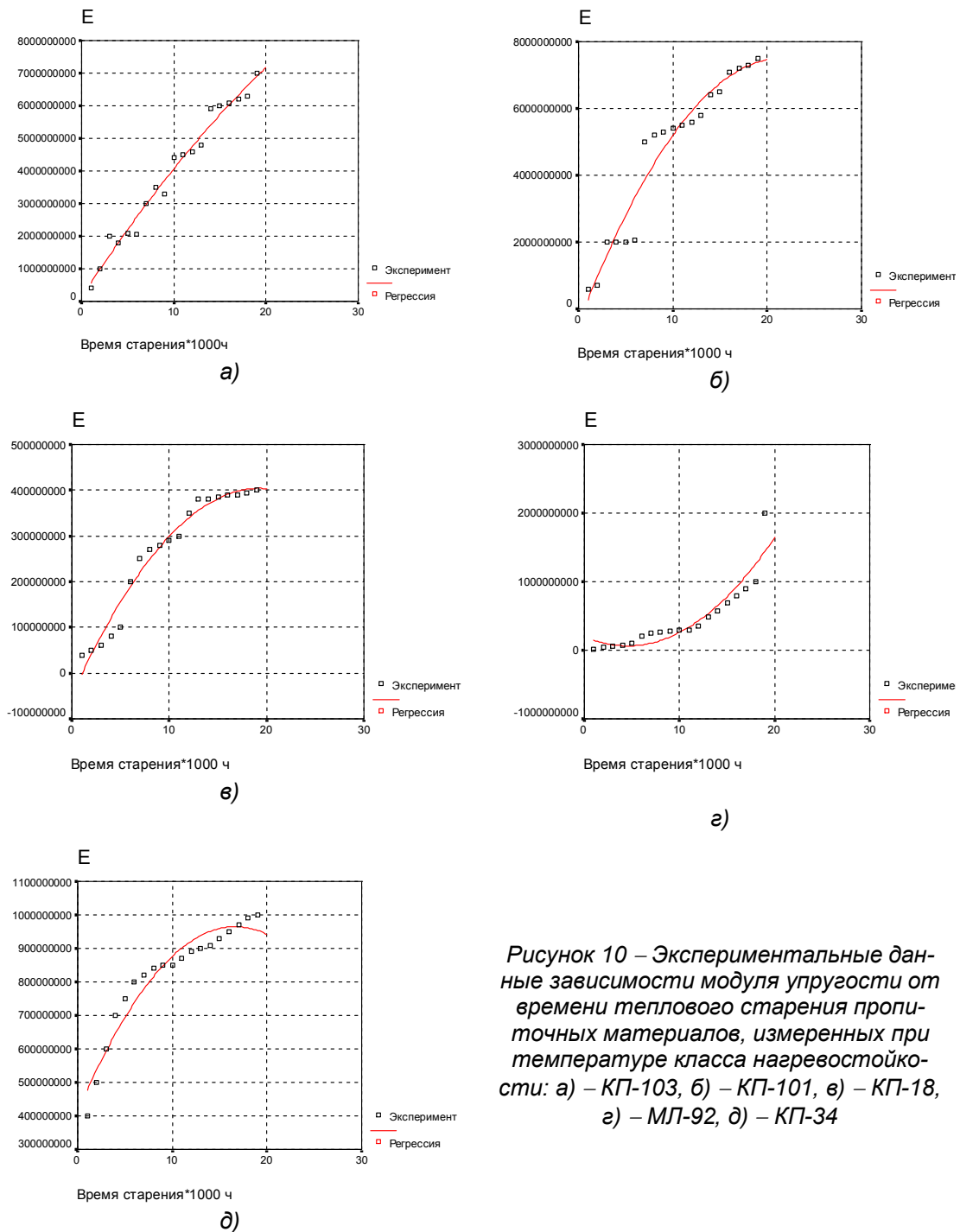


Рисунок 10 – Экспериментальные данные зависимости модуля упругости от времени теплового старения пропиточных материалов, измеренных при температуре класса нагревостойкости: а) – КП-103, б) – КП-101, в) – КП-18, г) – МЛ-92, д) – КП-34

В процессе эксплуатации происходит старение изоляции, при этом значение диагностического параметра (ДП) E возрастает. Для унификации значений ДП, наглядности и удобства использования на практике необходимо произвести его нормирование (рисунок 11):

$$E_{\text{норм}} = E_{\text{ном}} / E,$$

где $E_{\text{норм}}$ – нормированный ДП, $E_{\text{ном}}$ – номинальное значение ДП, соответствующее

ПОЛУНОВСКИЙ ВЕСТНИК №4 2009

стадии изготовления ЭМ, E – измеренное значение ДП.

Проведенные экспериментальные исследования подтверждают, что диагностический параметр E позволяет адекватно описывать динамику изменения состояния изоляции обмоток статора в процессе эксплуатации ЭМ и согласуется с разработанной моделью.

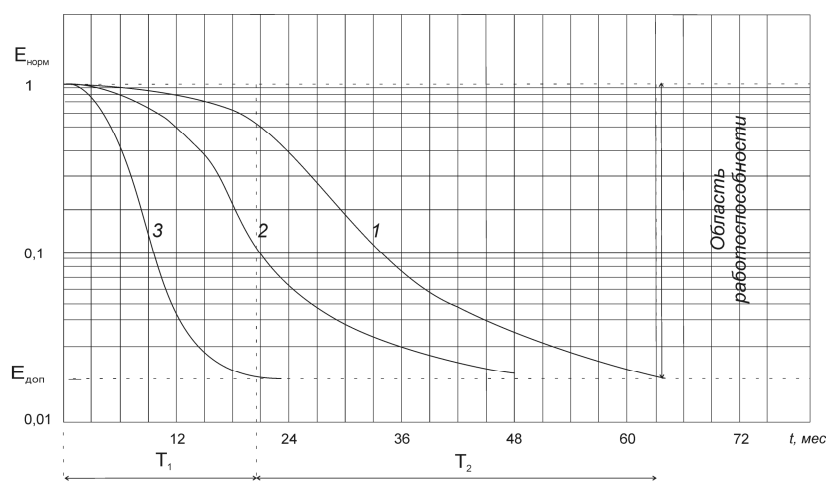


Рисунок 11 – Изменение нормированного E в процессе старения изоляции АД: T_1 – период нормальной эксплуатации, T_2 – период старения; режимы эксплуатации: 1 – нормальный, 2 – повышенная влажность и температура, 3 – резкие колебания температуры, повышенная вибрация и влажность

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ермолов, И.Н. Теория и практика ультразвукового контроля. – М.: Машиностроение, 1981. – 240 с., ил.
2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики: Учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. шк., 1989. – 608 с.
3. Суханкин Г.В., Герцен Н.Т. Диагностика полимерной изоляции электрических машин с помо-

щью акустических волн / Современные методы экспериментальных исследований. Вестник Томского государственного университета №64 март. Томск, 2006. С. 44–51.

Суханкин Г.В., к.т.н., Герцен Н.Т., к.т.н., тел. (3852) 29-07-44