

КОМПЬЮТЕРНАЯ СИСТЕМА АКУСТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Н.Т. Герцен, Г.В. Суханкин

Разработана компьютерная система диагностики состояния изоляции электрических машин на основе измерения затухания акустической волны, генерируемой взаимодействием проводников обмотки, через которые пропускается диагностический ток. По величине затухания звука, распространяющегося в изоляции, можно судить о степени её теплового старения на различных этапах эксплуатации электрической машины.

В процессе эксплуатации изоляция электрических машин подвергается комплексному воздействию электрического поля, нагрева, влаги, внешней агрессивной среды, механических напряжений, колебаний температур, активных химических веществ и т.д. В результате этого, в полимерных изоляционных материалах возникают как обратимые, так и необратимые процессы, которые приводят к ухудшению их диэлектрических и физико-механических показателей. Степень ухудшения физико-механических показателей, а, следовательно, самой изоляции можно контролировать измерением затухания акустической волны, возникающей вследствие микроперемещений проводников обмотки.

Акустическое давление в элементарном объеме изоляции создаёт два типа напряжений: нормальные - T_{xx} , T_{yy} , T_{zz} и тангенциальные - T_{xy} и T_{yz} и T_{zx} T_{yx} и T_{xz} . Напряженное состояние полимерного материала характеризуется тензором третьего ранга:

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

В этом тензоре компонент напряжения выражается первым индексом, а вторым – ориентация площадки, на которую эта сила действует [1].

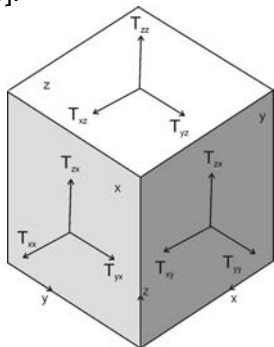


Рис. 1. Тензор напряжения в элементарном объеме полимерной изоляции электрической машины

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, диагональные компоненты которого определяются соотношениями

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

где u_x , u_y и u_z - компоненты вектора смещения, представляют собой удлинения ребер куба dx , dy и dz (рис. 2). Компоненты представляют собой одновременный сдвиг двух граней куба (рис. 2).

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

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

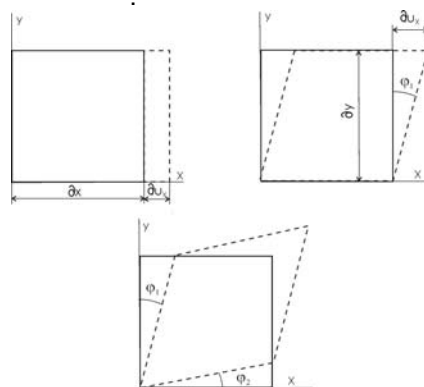


Рис. 2. Тензор деформации в элементарном объеме изоляции

Если модель полимерной изоляции обладает свойствами, которые не зависят от направления, то связь между компонентами T_{ik} ε_{ik} при i не равно k выражается законом Гука [1]

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

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 μ .

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

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} &= (\lambda + \mu) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + \mu \nabla u_x; \\ \rho \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} &= (\lambda + \mu) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} + \mu \nabla u_y; \\ \rho \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} &= (\lambda + \mu) \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} + \mu \nabla u_z, \end{aligned} \quad (2)$$

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

При $\varepsilon=0$ из уравнения (2) для одной из координат [1]:

$$\frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} = \frac{\mu}{\rho} \nabla u_x \quad (3)$$

Рассмотрим волновой процесс в полимерной изоляции на основе наиболее простого волнового уравнения (3) перейдя от смещения u к амплитуде волны a . Одновременно введём упрощение: функция Ψ зависит от одной координаты, например, x . Тогда уравнение (3) преобразуется в следующий вид:

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

Решение подобного уравнения в частных производных имеет вид

$$\Psi = \Psi_1(x - ct) + \Psi_2(x + ct),$$

где Ψ_1, Ψ_2 – функция волны, распространяющаяся в прямом и обратном направлениях. Для упрощения решения задачи опустим слабое с Ψ_2 .

Предположим, что распространяющаяся волна является гармонической, тогда

$$\Psi = A \cos\left(\frac{\omega}{c}(x - ct)\right) \quad (4)$$

где A – амплитуда волны, $\omega = 2\pi f$ – круговая частота, f – частота колебаний, $\omega(x - ct)/c$ – фаза. С учётом волнового числа $k = \omega/c = 2\pi/\lambda$ уравнение (4) приобретает вид:

$$\Psi = A \cos(kx - \omega t) \quad (5)$$

Физический смысл имеет действительная часть комплексной величины ψ , т.е. $\Psi = \text{Re} \psi$. В полимерной среде необходимо учитывать затухание акустической волны, связанное с внутренним трением, неидеальным упругим свойствам и другим эффектам. 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 изоляции. Для упрощения решения задачи будем учитывать только поглощение звука введением мнимой части в волновое число $k = 2\pi/\lambda + i\alpha$. Таким образом, распространяющаяся в полимерной изоляции акустическая волна в экспоненциальной форме:

$$\psi = A e^{i(kx - \omega t) - \alpha x} \quad (6)$$

где x – путь распространения волны.

Учитывая, что $\alpha = 2(-2E\pi^2\lambda^2 - \pi^2\lambda\rho c^2 + (4E\pi^4\lambda^4\rho c^2 + 4E\pi^4\lambda^6\rho c^2 + \pi^4\lambda^8\rho c^4)1/2)/E\lambda^2$ [2],

где λ – длина волны, ρ – плотность изоляции, c – скорость волны, E – упругость изоляции, выражение (6) преобразуется в (7):

$$A = A_0 e^{-\frac{x}{E\lambda^2}(2(-2E\pi^2\lambda^2 - \pi^2\lambda\rho c^2 + \sqrt{(4E\pi^4\lambda^4\rho c^2 + 4E\pi^4\lambda^6\rho c^2 + \pi^4\lambda^8\rho c^4)}))} \quad (7)$$

где A_0 – начальная амплитуда.

Сила взаимодействия двух проводников в модели паза обмотки электродвигателя (рис. 4)

$$F = \frac{\mu \mu_0 i^2 l}{2\pi a} \quad (8)$$

так как ток в проводниках имеет одинаковое значение. На площадку, ограниченную длиной l и высотой, равной диаметру проводника d , площадью S действует давление P равное отношению силы F к площади S .

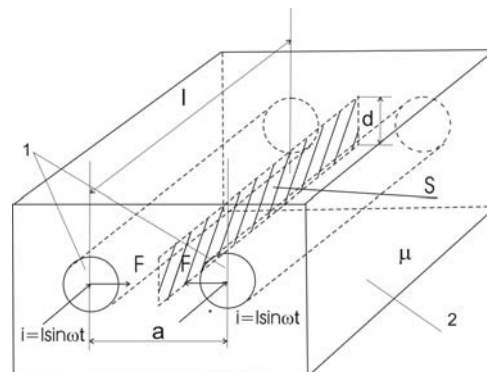


Рис. 4. Модель паза обмотки асинхронного двигателя: 1 – проводники обмотки, 2 – изоляция

Таким образом, если перейти от амплитуд звуковой волны к звуковым давлениям, то

$$P = P_0 e^{-\frac{x}{E\lambda^2} (2(-2E\pi^2\lambda^2 - \pi^2\lambda\rho c^2 + \sqrt{(4E\pi^4\lambda^4\rho c^2 + 4E\pi^4\lambda^6\rho c^2 + \pi^4\lambda^8\rho c^4)}))} \quad (9)$$

Уравнение (9) описывает распространение плоской волны, а с учётом формирования волны, обусловленной взаимодействием двух проводников в это уравнение необходимо внести поправку, связанную с фокальными расстояниями r_1 и r_2 .

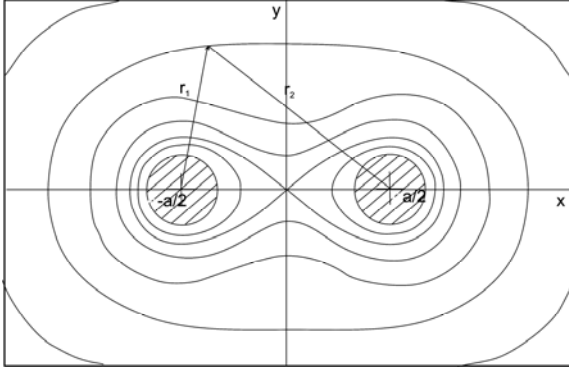


Рис. 5. Модель распространения волны при взаимодействии двух проводников обмотки в пазу: r_1 и r_2 - расстояния от центров проводников до эквипотенциальных поверхностей давления звуковой волны

Эквипотенциальные поверхности звуковой волны, порождаемой взаимодействием двух проводников описываются уравнением [4]:

$$(x^2 + y^2 + (a/2)^2)^2 - 4(a/2)^2 x^2 = r^2, \quad (10)$$

где $r_1 r_2 = r^2$.

Таким образом, акустическое давление:

$$P = P_0 e^{-\frac{r}{E\lambda^2} (2(-2E\pi^2\lambda^2 - \pi^2\lambda\rho c^2 + \sqrt{(4E\pi^4\lambda^4\rho c^2 + 4E\pi^4\lambda^6\rho c^2 + \pi^4\lambda^8\rho c^4)}))} \quad (11)$$

Подставляя (11), в выражение (12) звуковое давление

$$P = \frac{\mu\mu_0 I^2}{2\pi da} e^{-\frac{r(2(-2E\pi^2\lambda^2 - \pi^2\lambda\rho c^2 + \sqrt{(4E\pi^4\lambda^4\rho c^2 + 4E\pi^4\lambda^6\rho c^2 + \pi^4\lambda^8\rho c^4)}))}{E\lambda^2}} \quad (12)$$

В качестве чувствительного элемента в данном методе используется пьезоэлемент. Представим пьезопластину с характеристическим акустическим импедансом $Z_1 = \rho_1 c_1$ нагруженной на две среды с входными импедансами Z_0 и Z_2 (рис. 6).

Пьезопластина толщиной h_1 считается бесконечно протяжённой в направлении, перпендикулярном x , так что влияниями краёв пластины можно пренебречь. Пьезодатчик подключён к электрической цепи, которая обладает некоторым входным сопротивлением Z_a . Задача о приёме звуковых волн сводится к расчёту эквивалентной электрической цепи.

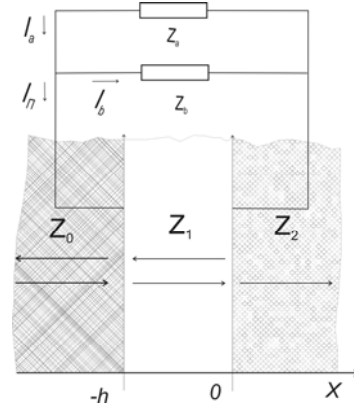


Рис. 6. Схема для расчёта электроакустического тракта

Из протяжённой среды с характеристическим импедансом $z = \rho c$ падает волна с акустическим напряжением T на систему тонких слоёв и, пройдя её, достигает пьезоприёмника. Решается подобная задача с помощью теории взаимности, построенной на системе аналогий акустическое давление - электрическое напряжение, колебательная скорость - электрический ток. В результате получаем следующее выражение для падения напряжения U на входном сопротивлении z_a [1]:

$$U = T \frac{2eS}{h_1 z_1} z_a B F_1 G \quad (13)$$

Используя (12) и считая, что на границе поверхность электрическая машина - датчик акустическое напряжение со стороны электродвигателя и акустическое напряжение со стороны датчика - корпус равны исходя из граничных условий, то тогда величины P из (12) и T из (13) являются идентичными. Таким образом, степень теплового старения изоляции электрической машины связана с напряжением на выходе датчика зависимостью:

$$U = \frac{\mu\mu_0 I^2}{2\pi da} \frac{2eS}{h_1 z_1} z_a B F_1 G e^{-\frac{r(2(-2E\pi^2\lambda^2 - \pi^2\lambda\rho c^2 + \sqrt{(4E\pi^4\lambda^4\rho c^2 + 4E\pi^4\lambda^6\rho c^2 + \pi^4\lambda^8\rho c^4)}))}{E\lambda^2}}$$

На основе вышеизложенной теории разработан измерительный комплекс (рис. 7). Для исследования упругих характеристик полимерных материалов и изоляции создана экспериментальная установка, включающая в себя аппаратное и программное обеспечение. Управляется измерительный комплекс компьютерной программой лабораторных и научных исследований LabVIEW [5].

Графическая среда программирования LabVIEW является средством разработки инструментальных систем. Цель LabVIEW состоит в упрощении задачи программирования с тем, чтобы исследователь мог использовать все возможности измерительного комплекса.

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 4 2007

КОМПЬЮТЕРНАЯ СИСТЕМА АКУСТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Достижения в области обработки цифровых сигналов, вычислительной техники позволили существенно упростить и сделать универсальным комплекс объект – измерение. Имея датчик, аналого-цифровой преобразователь и специальные программные средства можно осуществлять функции множества измерительных приборов различного назначения, а также обрабатывать и представлять результаты измерений тех величин и в том виде, которые наиболее полно удовлетворяют требованиям исследователя. Такое программно – аппаратное устройство является основой так называемого виртуального прибора [5].

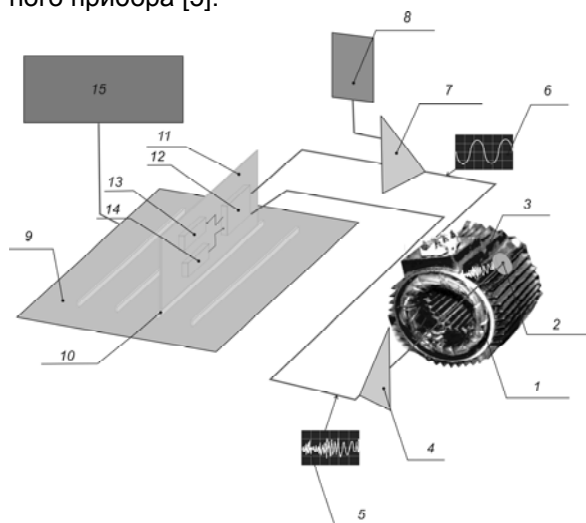


Рис. 7. Быстродействующая схема сопряжения измерительного комплекса: 1 – обмотка статора, 2 – датчик, 3 – диагностический сигнал, 4, 7 – усилители, 5 – усиленный сигнал, 6 – тестовый синусоидальный сигнал, 8 – источник тока, 9 – материнская плата, 10 – шина PCI, 11 – измерительная карта, 12 – буфер ввода-вывода, 13 – ЦАП, 14 – АЦП, 15 – программный пакет LabVIEW

С помощью разработанных технических средств путём испытания образцов пропиточных лаков в камере теплоты и влаги, а также на вибростенде при воздействии на них влажности (0-100%), температуры (0-200°C) и виброскорости (0-420 мм/с) получены данные по затуханию акустических волн, связанные с модулем упругости E и свидетельствующие о степени старения изоляции (рис. 8). Полученные результаты хорошо согласуются с данными из [6-10].

Полимерные материалы, предназначенные для изоляции обмоток, подвергаются статическим и динамическим механическим нагрузкам в процессе работы электрической машины. Обычно проводят оценку полимерных материалов по электрическим характери-

стикам, в частности, по электрической прочности.

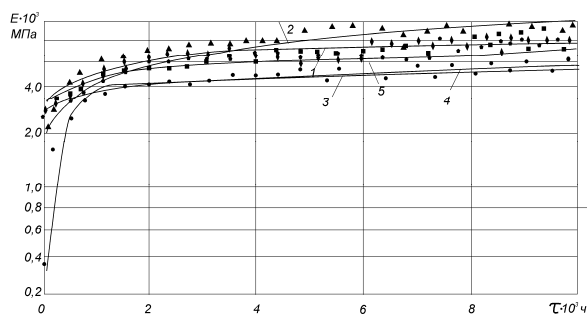


Рис. 8. Экспериментальные данные зависимости модуля упругости от времени теплового старения пропиточных материалов, измеренного при 20° С: 1–КП-103, 2–КП-101, 3–КП-18, 4–МЛ-92, 5–КП-34

Статистические данные, полученные во время эксплуатации электродвигателей, показывают, что работоспособность изоляции в значительной степени зависит от физико-механических свойств полимерных материалов, из которых она изготавливается. Более того, если электрические нагрузки действуют на изоляцию только в период эксплуатации, то механические нагрузки и, в первую очередь, внутреннее напряжение действуют на неё как в период работы электродвигателя, так и в период, когда он отключён. Они возникают в полимерных материалах в процессе изготовления или ремонта электродвигателя и действуют в нём весь срок до момента выхода его из строя. Недооценка роли внутренних напряжений и недостаточный учет механических нагрузок на изоляцию в конструкции приводят к ухудшению ее эксплуатационных свойств, снижению надёжности [10]. Диагностикой полимерных материалов на этапе изготовления или ремонта электродвигателя обеспечивается сознательный подход к их выбору для обеспечения нормального функционирования изоляции. Основными характеристиками полимерных материалов, влияющими на работоспособность изоляции, являются модуль сдвига G и коэффициент Пуассона μ . Кроме того, во время пропиточных операций, важен контроль вязкости η . Используя эти показатели можно оценивать деформационные свойства полимеров. Прочностные свойства оцениваются по кратковременному пределу прочности и характеризуются температурно-временной зависимостью. Одним из важных параметров полимеров является ТКЛР (температурный коэффициент линейного расширения).

Для контроля процесса отверждения изоляции необходимо наблюдение за превращением системы из жидкого состояния в твёрдое. При этом производят измерение η и G и их отношения τ с помощью акустических импульсов исходя из соотношения:

$$R = \frac{-iZ'_1 - Z}{-iZ'_1 + Z},$$

где R – коэффициент отражения, Z , Z'_1 – соответственно импеданс эталона и изоляции (рис. 8).

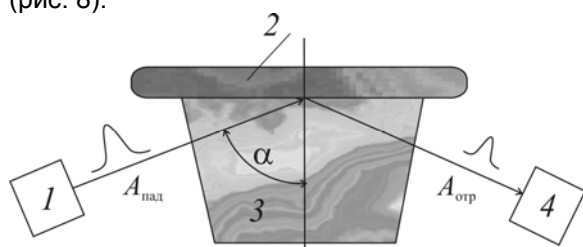


Рис.8. Распространение сдвиговой волны на границе двух сред: 1 – излучатель, 2 – изоляция, 3 – эталон, 4 – датчик, $A_{\text{пад}}$, $A_{\text{отр}}$ – соответственно амплитуда падающей и отраженной волн, α – угол падения

При генерации сдвиговой волны, величина деформации в граничном слое пропорциональна тому, насколько согласован сдвиговый механический импеданс Z изоляции с импедансом эталона. Если чувствительный датчик установлен так, чтобы измерить энергию отражённого импульса, то по относительному ослаблению интенсивности колебаний можно судить о свойствах изоляции, так как ослабление пропорционально Z , а твёрдые эталоны имеют высокие значения импеданса. Импульсы, прошедшие через подложку собираются и фиксируются в виде отражённой волны с экспоненциально убывающей амплитудой, интенсивность поглощения Δ которой рассчитывается в децибелах (дБ).

Величина Δ связана с коэффициентом отражения R формулой (рис. 2):

$$\lg R = -\Delta/40. \quad (14)$$

Изменения значения Δ как функции отверждения можно использовать для исследования кинетики процесса отверждения изоляции. Абсолютные значения импеданса рассчитываются по упрощённой формуле, следующего из выражения (1) [3]:

$$Z \approx 1,57 \cdot 10^4 (1-R)/(1+R).$$

где численный коэффициент, например, для плавленого кварца в качестве эталона находится как $Z_{\text{qcos}\alpha}$. Величина G' вычисляется по формуле (рис. 3):

$$G' \approx \rho Z^2 \approx 2,5 \cdot 10^8 \left(\frac{1-R}{1+R} \right)^2.$$

С учётом, что $\rho \approx 1$, точность измерения снижается с уменьшением R . Возможно измерение G'' изоляции с помощью независимых измерений сдвига фазы.

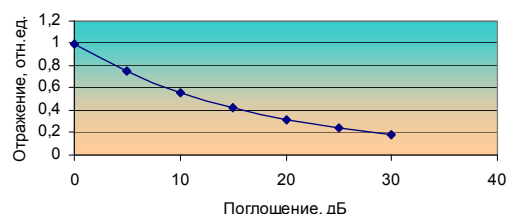


Рис. 9. Зависимость коэффициента отражения R от поглощения в исследуемой среде

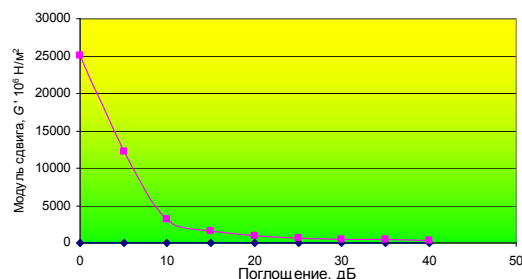


Рис. 10. Зависимость модуля сдвига от поглощения сдвиговых импульсов

Для контроля твёрдых полимеров методом отражения волна сдвиговых деформаций распространяется в эталоне и отражается от поверхности, на котором находится изоляция. Для контроля жидкой фазы изоляции наиболее приемлемым является метод, основанный на использовании поверхностных волн, которые распространяются на границе эталон–изоляция. Эталон, представляющий собой тонкую металлическую пластинку с размерами $a \times 2b$ создаёт необходимые колебания, если к её торцу закрепить излучатель акустических волн (рис. 11).

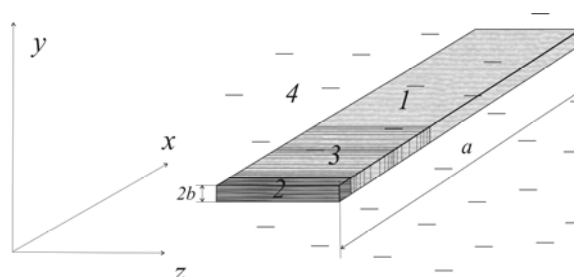


Рис. 11. Прямоугольная пластинка, предназначенная для измерения вязкоупругих характеристик жидкой фазы изоляции: 1 – алюминиевая пластинка, 2 – источник акустических волн, 3 – волновые колебания, 4 – изоляция

Если пластинку поместить в изоляцию, поглощение колебаний увеличивается, а их скорость падает. Снижение скорости объясняется сдвигом фазы. Разница параметров рассматриваемой схемы до и после помещения пластинки в изоляцию позволяет рассчитать её вязкоупругие характеристики. Геометрические параметры пластинки значительно превышают длину сдвиговой волны, распространяющуюся в ней, поэтому метод основывается на использовании пластинки неограниченных размеров. Модель, используемая для вычислений, показана на рис. 12. Координатные плоскости со значением $y=\pm b$ соответствуют поверхности пластинки. Эталон находится в пределах $y \geq b$ и $y \leq -b$. Колебания распространяются вдоль оси x и симметричны относительно плоскости $y=0$ со смещением по оси $\pm z$. На границе сдвиговые колебания пластинки совпадают с колебаниями в изоляции.

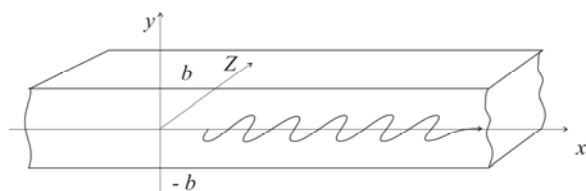


Рис. 12. Сдвиговые колебания в эталоне

Распространение сдвиговых волн описывается путем использования второго закона Ньютона к элементарной площади $dx dy$:

$$G \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \quad (15)$$

где G – модуль упругости при сдвиге, ρ – плотность и u – смещение, зависящее от трёх параметров: координат x , y и времени t [11].

Изоляция является поглотителем колебаний, поэтому вместо μ должен использоваться комплексный коэффициент Пуассона в (15). Его действительная часть характеризует энергию колебаний вследствие упругих свойств, а мнимая – вязкую составляющую или способность превращать энергию колебаний необратимо в тепло. Решение уравнения (15) для рассмотренной схемы имеет следующий вид:

$$\omega_k = A_n e^{i\omega t} e^{-kx} (e^{ly} + e^{-ly}), \quad (16)$$

где ω – круговая частота, а k и l – комплексные числа, которые являются соответственно x -й и y -й компонентами. Действительные части этих величин характеризуют интенсивность поглощения волны в направлениях x и

y , а мнимые части описывают её фазовые составляющие.

Колебания в изоляции, находящейся над пластиной ($y \geq b$), определяется выражением

$$\omega_c = A_c e^{i\omega t} e^{(-Kx)} e^{(Ly)} \quad (17)$$

Величина ω одна и та же, как для образцовой пластинки, так и для изоляции. K и L – компоненты распространения колебаний в направлениях указанных на схеме, но в формулу (17) входит один экспоненциальный член, так как смещение сдвига происходит перпендикулярно направлению их распространения.

Выражения (17) являются решениями выражения (16) при следующих условиях.

$$\begin{aligned} k^2 + l^2 + \left(\frac{\omega^2 \rho_n}{G_n^*} \right) &= 0 \\ K^2 + L^2 + \left(\frac{\omega^2 \rho_c}{G_c^*} \right) &= 0 \end{aligned} \quad (18)$$

Процессы, происходящие на границе двух сред, описываются решениями на основе граничных условий и требуют непрерывности смещений и напряжений, действующих в этом месте. Рассмотрим условия только на поверхности $y=b$, учитывая симметрию распространения волн. Непрерывность смещений при $y=b$ выглядит так:

$$K=k \text{ и } A_c e^{(-Lb)} = A_l (e^{(lb)} + e^{(-lb)})$$

Другое граничное условие обуславливается непрерывностью напряжений и смещений

$$\left. \frac{\sigma_c}{\omega_c} \right|_{y=b} = \left. \frac{\sigma_l}{\omega_l} \right|_{y=b} \quad (19)$$

С учётом сдвиговых волн на граничной поверхности акустическое напряжение выражается

$$\sigma = G^* \frac{\partial \omega}{\partial y} \Big|_{y=b}$$

Таким образом, условие (19) выглядит так:

$$-G_c^* L = \frac{G_l^* l (e^{(lb)} - e^{(-lb)})}{(e^{(lb)} + e^{(-lb)})} \quad (20)$$

При $G_c^*=0$ (изоляция отсутствует), решение (20) относительно действительной и мнимой части l

$$\begin{aligned} \text{Re}(l) &= 0 \\ \text{Im}(l) &= \frac{I\pi}{b}, \quad I=0,1,2,\dots \end{aligned}$$

Параметр l определяет гармоники колебаний. При заданной толщине пластинки имеется предельное значение частоты, ниже которой возможно распространение колебаний только с $l=0$. На более высоких частотах возможна генерация новых гармоник. Для $l=0$ при определённых условиях решение уравнения (20) относительно k записывается так:

$$k_a = i\omega \sqrt{\frac{\rho_l}{G_l}} \quad (21)$$

В случае измерения, когда пластина погружается в изоляцию решение уравнения (8) может быть представлено через величину изменения Δk , связанную с ее присутствием

$$l = \left[-\left(\frac{\omega^2 \rho_l}{G_l^*} \right) - (k_a + \Delta k)^2 \right]^{1/2}$$

Используя k_a из формулы (21)

$$l = -2i\omega \Delta k \left(\frac{\rho_l}{G_l^*} \right)^{1/2} - (\Delta k)^2 \quad (22)$$

При жидкой фазе изоляции, возможные следующие упрощения. Учитывая малость величины Δk формулу (22) можно упростить. Тогда

$$l \approx \left[-2i\omega \Delta k \left(\frac{\rho_l}{G_l^*} \right)^{1/2} \right]^{1/2}$$

Произведение lb мало, поэтому

$$lb \approx e^{lb} - \frac{e^{-lb}}{e^{lb} + e^{-lb}},$$

тогда граничное условие можно представить в виде

$$-G_c^* L = G_l^* l^2 b = -2G_l^* i\omega \Delta k b \left(\frac{\rho_l}{G_l^*} \right)^{1/2} \quad (23)$$

Так как $k^2 \ll -\frac{\omega^2 \rho_l}{G_l^*}$, поэтому (23) можно записать так:

$$L \approx i\omega \sqrt{\frac{\rho_c}{G_c^*}}$$

Учитывая (22) и (23)

$$\sqrt{\rho_c G_c^*} = 2\sqrt{\rho_l G_l^*} b \Delta k \quad (24)$$

Механический импеданс материала связан с модулем сдвига

$$Z^2 = \rho G^*$$

Соотношение (11) с учётом последней формулы

$$Z_c = 2Z_l b \Delta k$$

При сдвиговых волнах импеданс изоляции может быть найден как произведение известного импеданса эталона на его толщину и разность Δk , определённую при ее наличии и отсутствии.

Таким образом, экспериментально измеряемой величиной является комплексная величина Δk , которая определяется как $\Delta k = D + i\Theta$.

Увеличение интенсивности затухания, связанной помещением эталона в изоляцию является действительной частью этой формулы, мнимая же часть обусловлена фазовыми изменениями колебаний [11]. Некоторые данные, полученные по данной методике по отверждающейся эпоксидной смоле, при $t=25^\circ$ на частоте 1,6 МГц приведены в таблице.

Таблица
Данные, полученные с помощью метода колеблющейся пластинки для эпоксидной изоляции

Время, ч	Вязкость, η , кг/м·с	Модуль сдвига, Н/м ²	
		G'	G''
1	$0,83 \cdot 10^{-2}$	$33 \cdot 10^{-5}$	$19 \cdot 10^{-5}$
5	$1,12 \cdot 10^{-2}$	$47 \cdot 10^{-3}$	$34 \cdot 10^{-3}$
10	$1,33 \cdot 10^{-1}$	$64 \cdot 10^{-1}$	$56 \cdot 10^{-1}$
15	1,54	$21 \cdot 10^4$	$11 \cdot 10^4$
20	-	$35 \cdot 10^5$	$44 \cdot 10^5$
24	-	$12 \cdot 10^9$	$9 \cdot 10^9$

Для получения количественных характеристик чувствительности рассмотренных методов измерений физико-механических показателей изоляции следует сравнить формулу (22) с расчётным выражением, применяемым при измерении коэффициента отражения.

$$\frac{Z_{из}}{Z_э} = 0,5 \cos \varphi \Delta k_r$$

где $Z_э$ – импеданс эталона, $Z_{из}$ – импеданс изоляции, φ – угол между направлением распространения волны и нормалью к поверхности, Δk_r – изменение постоянной распространения при однократном отражении. Длина пути волны в измерительной схеме, используемой метод отражений, составляет единицы сантиметров, поэтому чувствительность метода колеблющейся пластинки на порядок выше. Таким образом, при подготовительных операциях, связанных с ремонтом электродвигателей, когда изоляция ещё не полимеризовалась и имеет низкую вязкость удобно использовать именно метод колеблющейся пластинки. Алюминиевые пластинки можно использовать с пьезоэлектрическими

КОМПЬЮТЕРНАЯ СИСТЕМА АКУСТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

излучателями, возбуждающими колебания с частотой 2-5 МГц. Рассмотренные устройства могут работать в широком диапазоне частот, но не все частоты пригодны для измерения вязкоупругих характеристик изоляции. При частотах свыше 9-10 МГц возникают гармоники отличные от основной с условием $l \neq 0$, что значительно усложняет поведение системы. Короткие синусоидальные пакеты частично устраняют эти проблемы. Так как каждой гармонике соответствует своя скорость распространения волны, становится возможным выделять импульсы, связанные с различными колебаниями. Таким образом, можно выделить колебания с $l=0$ подбирая длину пластинки длительность импульса и частоту.

Для исследования вязкоупругих характеристик полимерных изоляции создана экспе-

риментальная установка, включающая в себя аппаратное и программное обеспечение. Управляется измерительный комплекс компьютерной программой лабораторных и научных исследований LabVIEW [5]. Функциональная панель изоляции и измерительного комплекса приведены на рис. 13 и 14.

Таким образом, показатели G и E можно использовать в качестве дополнительного диагностического параметра состояния изоляции электродвигателей.

Областью применения разработанных технических средств является оценка качества изоляции электрических машин, прогнозирование состояния изоляции, измерение её физико-механических параметров.

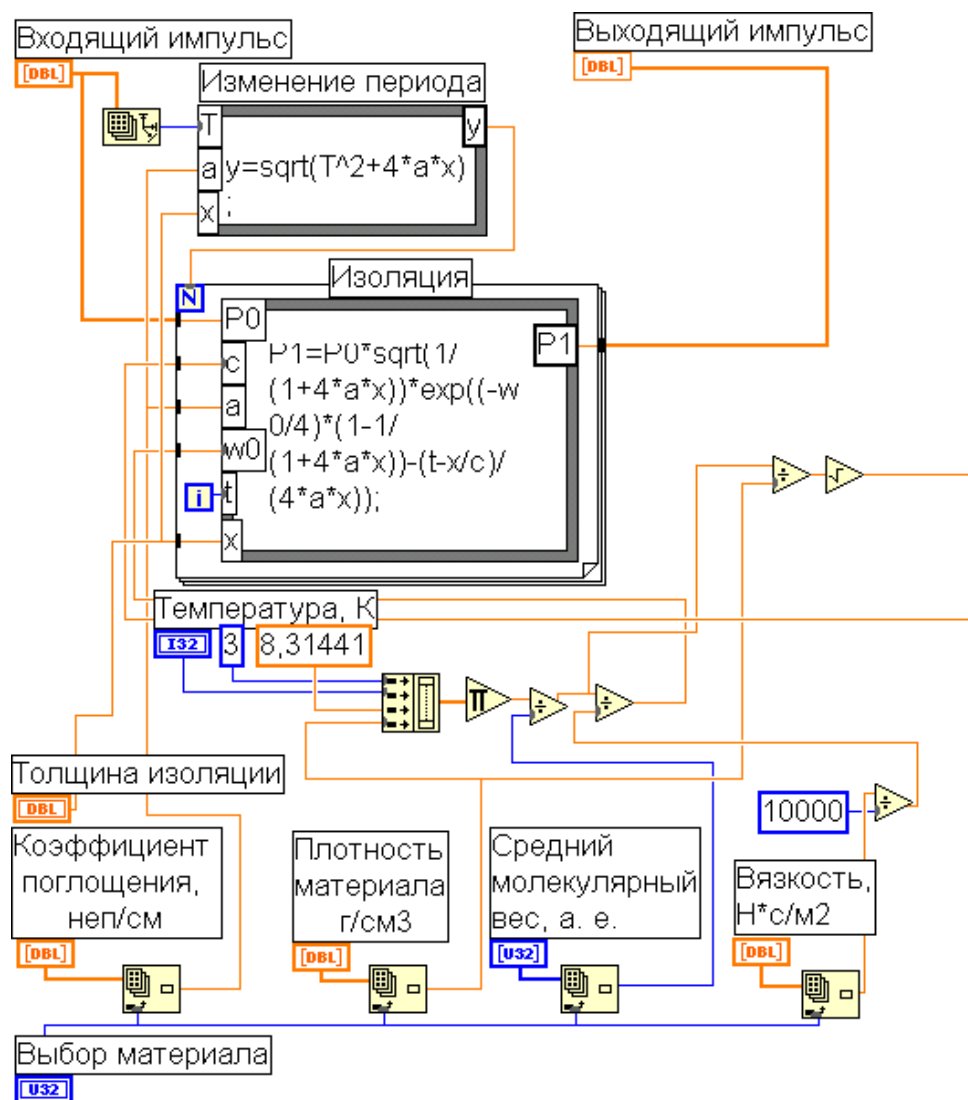


Рис. 13. Функциональная панель изоляции

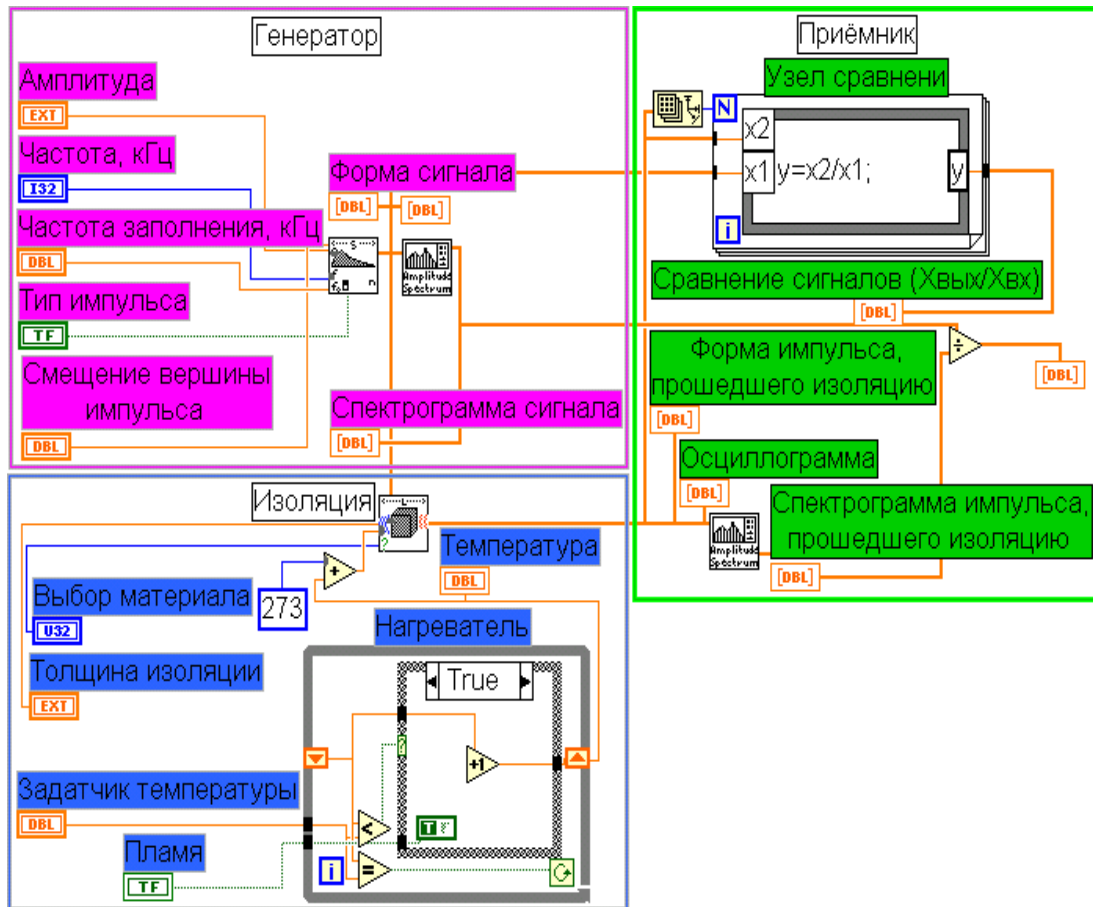


Рис. 14. Функциональная панель измерительного комплекса

ЛИТЕРАТУРА

1. Ермолов И.Н. Теория и практика ультразвукового контроля. – М.: Машиностроение, 1981. – 240 с., ил.
2. Перепечко И.И. Акустические методы исследования полимеров. – М.: Химия, 1973. – 289 с.
3. Кошкин Н.И., Ширкевич М.Г. Справочник по элементарной физике. – М.: Наука, 1975.-256с., ил.
4. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров: Пер. с англ./ Под ред. И.Г. Арамановича. – М.: Наука, 1984. – 832 с.
5. Жарков Ф.П., Каратаев В.В. и др. Использование виртуальных инструментов LabVIEW. – М.: Радио и связь, 1999.- 266 с.
6. Гладков А.Э. Электроизоляционные лаки и компаунды. – М.: Энергия, 1973. – 247 с.
7. Гольдберг О.Д. Надёжность электрических машин общепромышленного и бытового назначения: Материалы лекций. – М.: Знание, 1976. – 57 с.
8. Козырев Н.А. Изоляция электрических машин и методы её испытаний. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962. – 264 с.
9. Кан К.Н., Николаевич А.Ф. Шанников В.М. Механическая прочность эпоксидной изоляции.- Л.: Энергия, 1973.
10. Галушко А.И., Максимова И.С. и др. Надёжность изоляции электрических машин. – М.: Энергия, 1979. – 176 с., ил.
11. Viscoelastic relaxation in polymers. Edited by M.SHEN. Interscience publisher a division of John Wiley and sons, Inc. Los Angeles, 1971.