

УДК 621.313.333.2

С.М. ЗЛЕПКО, В.Е. КРИВОНОСОВ, Л.Г. КОВАЛЬ
Вінницький національний технічний університет**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СКОРОСТНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ СОПРОТИВЛЕНИЙ
ИЗОЛЯЦИИ В ДИАГНОСТИЧЕСКИХ СРЕДСТВАХ ЗАЩИТЫ
МЕДИЦИНСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

Долговечность и надежность работы электрооборудования зависит от сохранения своих свойств электрической изоляции. Большое влияние на ускорение процесса старения изоляции оказывает влага в сочетании с пылью на поверхности изоляции. Пыль приводит к локальному повышению температуры изоляции и ее термическому старению. Увлажненная пыль на поверхности изоляции увеличивает силу поверхностного тока. Для обеспечения надежной работы оборудования необходима разработка метода выявления и идентификации увлажнения изоляции, предельное ее запыление проводящей и непроводящей пылью, а также исследование физических и математических моделей для изучения процессов старения изоляции, создание технических средств для проведения эффективных контролируемых извне характеристик состояния изоляции.

Ключевые слова: объемная и поверхностная проводимость изоляции, диагностика состояния изоляции.

С.М. ЗЛЕПКО, В.Е. КРИВОНОСОВ, Л.Г. КОВАЛЬ
Вінницький національний технічний університет**ВИКОРИСТАННЯ ШВИДКІСНИХ ЗМІН ОПОРІВ ІЗОЛЯЦІЇ У ДІАГНОСТИЧНИХ ЗАСОБАХ
ЗАХИСТУ МЕДИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ**

Довговічність і надійність роботи електрообладнання залежить від збереження своїх властивостей електричної ізоляції. Великий вплив на прискорення процесу старіння ізоляції здійснює волога в поєднанні з пилом на поверхні ізоляції. Пил призводить до локального підвищення температури ізоляції і її термічного старіння. Зволожений пил на поверхні ізоляції збільшує силу поверхневого струму. Для забезпечення надійної роботи обладнання необхідна розробка методу виявлення та ідентифікації зволоження ізоляції, граничне її запилення провідним і непровідним пилом. Дослідження фізичних і математичних моделей для вивчення процесів старіння ізоляції, створення технічних засобів для проведення ефективних контрольованих ззовні характеристик стану ізоляції.

Ключові слова: об'ємна і поверхнева провідність ізоляції, діагностика стану ізоляції.

S.M. ZLEPKO, V.E. KRIVONOSOV, L.G. KOVAL
Vinnitsa National Technical University**USE OF SPEED CHANGES OF INSULATION RESISTANCE IN DIAGNOSTIC MEANS OF
PROTECTION OF MEDICAL EQUIPMENT**

The durability and reliability of electrical equipment depends on the preservation of its electrical insulation properties. A great influence on the acceleration of the aging process of insulation is caused by moisture in combination with dust on the surface of insulation. Dust leads to a local increase in the insulation temperature and its thermal aging. Humidified dust on the surface of the insulation increases the strength of the surface current. To ensure reliable operation of the equipment is the development of a method for identifying and indexing the humidification of insulation, limiting its dusting with conductive and non-conductive dust. Investigation of physical and mathematical models for studying the aging of insulation, the creation of technical means for conducting effective externally controlled characteristics of the insulation state.

Keywords: volume and surface conductivity of insulation, diagnostics of insulation state.

Постановка проблеми

Долговечность и надежность работы электрооборудования зависит от сохранения своих свойств электрической изоляцией. Причинами изменения свойств изоляции при ее эксплуатации являются, изменение физико-химических свойств составляющих ее материалов и воздействие комплекса внешних и внутренних факторов. В конечном итоге отказ изоляции можно квалифицировать как результат постепенного или внезапного ухудшения физико-химических свойств материала до уровня, при достижении которого дальнейшая надежная эксплуатация изоляции или оборудования становится невозможной [1].

По назначению электроизоляционные материалы не должны пропускать электрический ток под действием приложенного напряжения. Однако идеальных непроводников не существует, и все практически применяемые диэлектрики обнаруживают свойства электропроводности. Электропроводность диэлектриков объясняется наличием в них свободных ионов и электронов, которые могут передвигаться под воздействием электрического поля [2].

Различают объёмную проводимость изоляции G_v , численно определяющую проводимость через толщину изоляции и поверхностную проводимость изоляции G_s , характеризующую наличие слоя повышенной электропроводности на поверхности раздела твёрдой изоляции с окружающей газообразной или жидкой средой.

Соответственно вводятся понятия объёмного тока утечки I_v и поверхностного тока утечки I_s , а также объёмного сопротивления изоляции R_v и поверхностного сопротивления изоляции R_s . Удельное сопротивление твёрдых диэлектриков зависит от многих факторов: температуры, влажности, приложенного напряжения и напряженности электрического поля.

При повышении температуры удельное сопротивление электроизоляционных материалов, как правило, существенно уменьшается. Так, при повышении температуры изоляции от 15°C до 50°C токи утечки увеличиваются в 10 – 15 раз. Влияние температуры на срок службы изоляции от температуры, при которой она работает широко исследован [3, 4, 5], где за основу анализа принят эмпирический закон Вант Гоффом – Аррениуса. В соответствии с этим законом, повышение температуры на каждые восемь градусов приводит к сокращению срока службы изоляции вдвое. Эмпирический закон Вант Гоффом - Аррениуса, связывает константу скорости химической реакции с температурой процесса при изучении закономерностей термического старения изоляции. В основу теории электрического старения, т. е. старения в результате воздействия электрического поля, положена выведенная теоретическим путем формулы Эйринга [6], устанавливающая взаимосвязь константы скорости процесса разрушения межмолекулярных и межатомных связей с энергетическим состоянием изоляционного материала. По Эйрингу скорость этого процесса определяется не теплотой активации, а свободной энергией активации, которая зависит от температуры процесса и воздействия любого внешнего фактора (например, электрического поля, давления и т. п.). Формула Эйринга в основном применяется для определения остаточного срока эксплуатации электрической изоляции, работающей при напряжениях 6 кВ и выше.

Большое влияние на ускорение процесса старения изоляции оказывает влага в сочетании с пылью на поверхности изоляции. В основном проникновение влаги в изоляцию обмоток электрических машин происходит в нерабочие периоды, особенно при остывании изоляции, когда давление в порах и капиллярах изоляции несколько ниже атмосферного. Периодическое проникновение влаги в изоляцию и ее удаление подсушкой во время работы электрического оборудования способствует развитию пор в изоляции. Опасным является также увлажнение загрязненных обмоток. При увлажнении резко снижается напряжение пробоя в местах дефектов и тем самым создаются условия для возникновения дуговых разрядов при сравнительно низких значениях напряжений.

Анализ последних исследований и публикаций

Экспериментальные исследования показали, что при увлажнении обмоток с дефектами в изоляции сопротивление изоляции снижается в несколько десятков раз и при этом резко увеличиваются токи утечки через изоляцию. Попадание на поверхность изоляции проводящей пыли, при наличии неравномерного износа изоляции по длине, приводит к появлению разности потенциалов на поверхности изоляции и протеканию поверхностных токов, а выделенная при этом энергия ускоряет процесс старения изоляции.

И хотя известно, что пыль, согласно [7], приводит к локальному повышению температуры изоляции и ее термическому старению, а увлажненная пыль на поверхности изоляции увеличивает силу поверхностного тока, изменения диэлектрических свойств изоляции при ее запылении и увлажнении до сих пор недостаточно изучены.

Одним из путей обеспечения безаварийной работы медицинского оборудования является контроль технического состояния изоляции в процессе его эксплуатации.

Как правило, проверка диэлектрических свойств изоляционных материалов осуществляется в периоды пуско-наладочных работ и проведения планово-предупредительных ремонтов. В условиях экономического кризиса ряд предприятий Украины переходит от системы планово-предупредительных ремонтов к профилактикам оборудования по факту появления необходимости проведения ремонтных работ. Решение этой задачи приводит к разработке новых диагностических методов и устройств непрерывного контроля за состоянием узлов или оборудования в целом, предупреждающих о необходимости проведения профилактических мероприятий или включения защитных средств оборудования.

Формулирование цели исследования

Разработать метод выявления и идентификации увлажнения изоляции и её предельного запыления проводящей и непроводящей пылью. Исследовать физические и математические модели для

изучения процессов старения изоляции, создание технических средств для проведения эффективных контролируемых извне характеристик состояния изоляции.

Изложение основного материала исследования

Для анализа причин появления тока, протекающего по поверхности изоляции и выявления факторов, влияющих на его величину, рассмотрим участок изоляционного материала с неоднородными по толщине диэлектрическими свойствами. Появления таких неоднородностей в толщине изоляции связано с разными по величине термическими и динамическими силами, действующими на изоляцию. Условно, на прямолинейном участке изоляции выберем две точки, характеризующие две различные величины объемного сопротивления $Z_{из1}, Z_{из2}$. Значение величины сопротивления изоляции первой точки, которая подвергается лишь естественному старению, больше чем величина сопротивления второй точки, примем за базовую величину. Токи утечек в точках 1 и 2 соответственно определяются как:

$$I_{ym1} = \frac{U_{\phi} - U_1}{Z_{из1}}, \tag{3}$$

$$I_{ym2} = \frac{U_{\phi} - U_2}{Z_{из2}}, \tag{4}$$

где U_{ϕ} – фазное напряжение;

U_1 – напряжения на поверхности изоляции в точках 1 и U_2 – соответственно в точке 2;

$Z_{из1}, Z_{из2}$ – сопротивление изоляции в точках 1 и 2.

При одинаковых значениях величин объемных сопротивления, токи в точках 1 и 2 равны ($I_{ym1} = I_{ym2}$), равны и напряжения U_1 и U_2 на поверхности изоляции в этих точках, разность потенциалов $\Delta\varphi_{1,2} = (U_1 - U_2) = 0$, ток $I_{нов}$ отсутствует.

Если условия эксплуатации изоляции в точках 1 и 2 различные, то есть, изменились температурные, механические, динамические воздействия, и объемная неоднородность изоляционного материала то это приведет к неравенствам величин сопротивлений изоляции в точках 1 и 2.

Выразим величину сопротивления $Z_{из2}$ – в точке 2 через базовые значения величины сопротивления $Z_{из1}$, в точке 1,

$$Z_{из2} = Z_{из1} - \Delta Z, \tag{5}$$

где ΔZ – значение величины снижения сопротивления изоляции в точке 2 по сравнению со значением сопротивления изоляции в точке 2.

Токи утечки в точках 1 и 2 определяются как:

$$I_{ym1} = \frac{U_{\phi} - U_1}{Z_{из1}}, \tag{6}$$

$$I_{ym2} = \frac{U_{\phi} - U_2}{Z_{из1} - \Delta Z}. \tag{7}$$

Появившаяся разность потенциалов на поверхности изоляции между точками 1 и 2 определяется по формуле:

$$U_1 = U_{\phi} - I_{ym1} \cdot Z_{из1}, \tag{8}$$

$$U_2 = U_{\phi} - I_{ym2} \cdot (Z_{из1} - \Delta Z), \tag{9}$$

$$\Delta\varphi_{1,2} = U_{\phi} - I_{ym2} \cdot (Z_{из1} - \Delta Z) - U_{\phi} + I_{ym1} \cdot Z_{из1} = I_{ym1} \cdot \Delta Z. \tag{10}$$

Наличие проводящей пыли или увлажненной непроводящей пыли на поверхности изоляции, приводит к появлению поверхностного тока:

$$I_{нов} = \frac{\Delta\varphi_{1,2}}{R_{нов}} = \frac{I_{ym1} \Delta Z}{R_{нов}}, \tag{11}$$

где $R_{нов}$ – величина сопротивления на поверхности изоляции между точками 1 и 2.

При $\Delta Z = 0$, поверхностные токи отсутствуют.

Величина $R_{нов}$ – эквивалентное поверхностное сопротивление, которое зависит от толщины слоя пыли H , расстояния $l_{1,2}$ между точками 1 и 2, удельного сопротивления; поверхности изоляционного материала – $p_{из.мат}$, пыли – $p_{пыль}$, и увлажнения – $p_{вл}$. Поверхностное сопротивление рассчитывается по выражению

$$R_{нов} = \frac{1}{G_{нов}} = \frac{1}{G_{пыль} + G_{из.мат.} + G_{вл.}} \cdot \frac{l}{S}, \tag{12}$$

где $G_{пов}$ – эквивалентная удельная поверхностная проводимость;
 $G_{пыл}$ – удельная проводимость пыли;
 $G_{вл.}$ – удельная проводимость влаги;
 $G_{из.мат.}$ – удельная поверхностная проводимость изоляции;
 l – длина участка, покрытого пылью;
 s – площадь сечения пыли, лежащей на обмотке.

Величина поверхностного сопротивления $R_{пов}$ может изменяться от 0 и стремиться к естественному значению поверхностного сопротивления чистой поверхности изоляции, то есть к бесконечно большой величине, соответственно поверхностный ток изменяется от нулевого значения и стремится к большой величине. Даже незначительные величины поверхностных токов приводят к нагреву токопроводящих мостиков и локальному повреждению изоляции.

Для получения зависимостей изменения величин поверхностного сопротивления для различного состава и толщины пылевого покрытия, использовали датчик поверхностной проводимости. Датчик представляет собой парные, параллельно расположенные электроды, помещенные на диэлектрическую основу. На рис.1 приведен датчик поверхностного состояния. Рассматривая влияния поверхностного тока на состояния изоляции датчика, рис.1, покрыли проводящей пылью, что привело к образованию проводящих мостиков и явилось причиной повреждения поверхности изоляции.



Рис. 1. Датчик контроля поверхностного состояния изоляции

Результаты исследования изменения поверхностного сопротивления $R_{пов}$, для различных толщин слоя пыли h , имеющих различные значения коэффициентов удельной проводимости приведены на рис. 2.

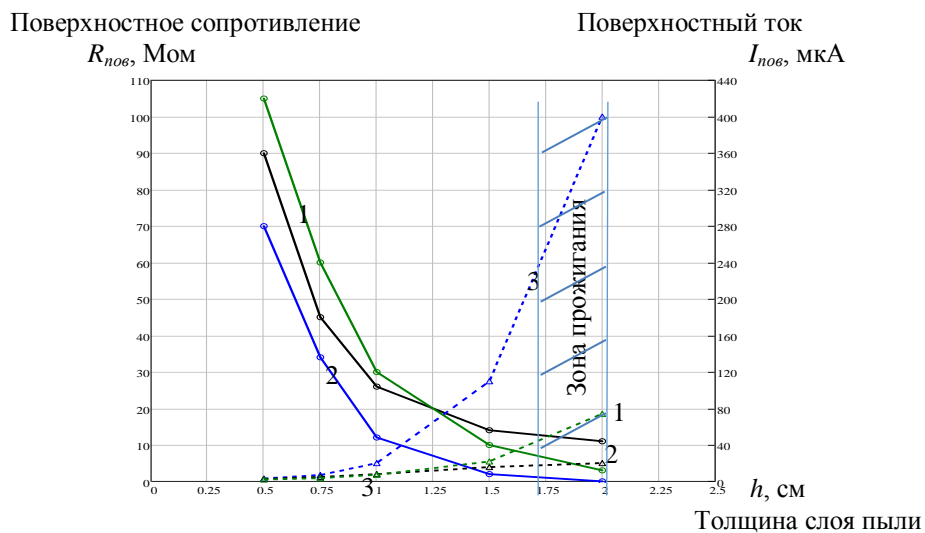


Рис. 2. Графики зависимости величины поверхностного сопротивления $R_{пов}$ и ток $I_{пов}$ для различных видов и толщин h слоя пыли, где: кривая 1 – окалина и производственная пыль; кривая 2 – строительная пыль; кривая 3 – графитовая пыль

Состав исследуемых материалов пылевого покрова, имеет различную удельную проводимость. Предельные значения удельных проводимостей выбранных материалов наглядно демонстрирует пределы изменения поверхностного тока, протекающего по изоляции.

Результаты исследования показали, что поверхностное сопротивление материала $R_{пов}$, состоящего из окалины (30 %) и производственной пыли (70 %) снижается с 105 Мом до 3 Мом, при увеличении толщины слоя с 0,5 до 2 см, (кривая 1, рис 3.3х.). Соответственно, для материала состав которого образует строительная пыль (кривая 2), сопротивление $R_{пов}$ снижается с 90 Мом до 11 Мом. Для пыли, в состав которой входит графит (кривая 3), сопротивление снижается с 70 Мом до 0,1 Мом.

Величина поверхностного тока $I_{пов}$, для смеси, состоящей из окалины и производственной пыли, увеличилась в 37 раз, при увеличении слоя пыли с 0,5 до 2 см. А. Величина поверхностного $I_{пов}$, для смеси, включающей строительную пыль, возросла в 8 раз и составила 20 мкА. Величина поверхностного ток, для смеси, состоящей из графита, $I_{пов}$ увеличился в 127 раз и составил 440 см.

Результаты исследования скоростных характеристик $V_{R_{пов}} = \frac{\partial R_{пов}}{\partial t}$, изменений поверхностного сопротивления для различного состава пыли при увлажнении и последующим нагревом, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Скорость изменения поверхностной сопротивлению датчика

Материал	Увлажнение		Нагрев	
	Толщина, см	$V_{R_{пов}}$	Толщина, см	$V_{R_{пов}}$
Окалина+пыль	0.5	25.3 Ом/мин	0.5	18.6 Ом/мин
Графит	0.5	0.6 кОм/мин	0.5	5,0 кОм/мин
Строит. пыль	0.5	25,0 кОм/мин	0.5	180,0 кОм/мин
Окалина+пыль	1.0	26,4 Ом/мин	1.0	24.5Ом/мин
Графит	1.0	0.2кОм/мин	1.0	3.5кОм/мин
Строит. пыль	1.0	38,5 кОм/мин	1.0	195,0 кОм/мин
Окалина+пыль	2.0	28,6 Ом/мин	2..0	22.8Ом/мин
Графит	2.0	0,08кОм/мин	2.0	1,6кОм/мин
Строит. пыль	2.0	49,2 кОм/мин	2.0	289,0 кОм/мин

На величину скоростного изменения поверхностного сопротивления пыли, имеющей величину удельного сопротивления в пределах $(0,2 - 16) \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$, увлажнение не оказывает заметного влияния.

Для состава пыли (бытовая, строительная и др.), обладающей большой гигроскопичностью, процессы увлажнения и удаления влаги при нагреве отличаются высокой скоростью изменения поверхностного сопротивления.

Данные исследования позволили разработать методику выявления естественного старения изоляции, запыления поверхности изоляции проводящей и непроводящей пылью, увлажнение изоляции, а также идентифицировать каждый вид состояния изоляции [8]. Данная методика применима для медицинского оборудования, работающего с технологическими паузами и в местах с запылённостью и изменяющейся влажностью окружающей среды.

Выводы

Предложен метод выявления и идентификации степени увлажнения изоляции, а также её предельного запыления, основанный на оценивании однородности состава диэлектрических свойств изоляции, определяющих разброс величин объемного сопротивления вдоль изоляционного материала, что влияет появление разности потенциалов на поверхности изоляции.

Список использованной литературы

1. Старение изоляции. Факторы, влияющие на этот процесс [Электронный ресурс]. – режим доступа: <http://prom-sn.ru/spravochnaya-informatsiya/stati/starenie-izolyatsii-factory-vliya-yushchie-na-etot-protsess.html>
2. Хусаинова З. Г. Электроизоляционные материалы / Хусаинова З. Г. //, М. 1975. – 460с.
3. Зюзев А. М. Термодинамические модели для проверки асинхронного двигателя по нагреванию / А. М. Зюзев, В. П. Метельков // Электротехника. – 2012. – № 9. – с. 48–52

4. Полковниченко Д. В. Математическое моделирование установившихся режимов работы асинхронных электродвигателей при наличии в них дефектов [Электронный ресурс]. – режим доступа: <http://www.donntu.edu/2006/eltf/marunevich>.
5. Кривонос В. Е. Управление сроком службы изоляции по скоростным характеристикам нагрева обмоток / Кривонос В. Е., Василенко С. В. // *Електротехніка і енергетика* : зб. наук. пр. Випуск № 11. – Донецьк: ДонНТУ, 2011. – с. 205–210.
6. Meshgin, J. Milimonfared, Effects of air-gap eccentricity on the power factor of squirrel cage induction machines. International conference on electrical machines (ICEM-2002), Old St. Jan Conference Center, Brugge, Belgium, Conference Record.
7. Кривонос В. Е. Влияние запыленной среды на срок службы обмоток статора асинхронных двигателе. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Издание Белорусского национального технического университета. / Кривонос В. Е., Василенко С. В. // г. М. Синст. №6, 2015 с. 35 – 40.
8. Пат. №101849 Україна МПК G01R 31\34(2006) № а 2011 04406 : Спосіб виявлення і розпізнавання дефектів ізоляції електродвигунів, які працюють в агресивних середовищах, і пристрій для його реалізації / Кривонос В. Е. // Опубл. 15.05.2013, Бюл. №9. 5с.