

УДК 621.314.5

ИССЛЕДОВАНИЕ ВИБРОСТОЙКОСТИ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОЧНЫХ ПРОВОДОВ

Решетняк А.В., асс.

Кременчугский государственный политехнический университет

Украина, 39614, Полтавская обл., г. Кременчуг, ул. Первомайская, 20, КГПУ

E-mail: ke@polytech.poltava.ua

Запропоновано спосіб розрахунку вібраційної стійкості ізоляції залежно від коефіцієнтів прискорення й отриманої стійкості при спільній дії двох або трьох факторів: амплітуди вібрації, тиску скребкової голки на ізоляцію й температури. Знято експериментальні залежності стійкості ізоляції при різних амплітудах вібрації, тиску скребкової голки на ізоляцію й температури. Побудовано тривимірні залежності терміну служби ізоляції від амплітуди, тиску й температури.

Ключеві слова: ізоляція, тиск, тривимірні залежності, вібростенд.

A method of calculation of insulation vibration resistance independent of speedup and obtained resistance when two or three factors: vibration amplitude, pressure of scraper needle on insulation, and temperature, act together, has been offered. Experimental dependences of insulation resistance at different vibration amplitudes, pressure of scraper needle on insulation and temperature have been removed. Three-dimensional dependences of insulation life on amplitude, pressure and temperature have been plotted.

Key words: insulation, pressure, three-dimensional dependences, vibration-testing machine.

Введение. Выход из строя трансформаторов и электродвигателей происходит в большинстве случаев из-за повреждения изоляции обмоток (85÷95%) [1]. Основной причиной ускоренного износа изоляции является вибрация: при прохождении тока по виткам между ними возникают силы притяжения-отталкивания, вызывающие их взаимное перемещение и, как следствие этого, трение. Износ изоляции зависит от многих факторов: взаимного расположения проводников, амплитуды вибрации, сил трения, температуры, пропитки, влажности и т. п. Для разработки мер по уменьшению воздействия вибрации на изоляцию необходимо изучение причин и механизмов влияния различных факторов на ее износ.

Цель работы. Разработка методов расчета вибрационного износа изоляции в зависимости от различных факторов; построение многомерных моделей, облегчающих расчет; разработка испытательных стендов.

Материалы и результаты исследований. С точки зрения вибрации можно выделить несколько вариантов размещения проводников в катушках (рис. 1, а и б).

1. Витки расположены параллельно и зафиксированы на катушке в местах перегиба провода (рис. 1,а). Обычно витки наматываются плотно один к другому, однако по технологическим причинам между ними может быть зазор. При протекании по виткам тока (в одном направлении) они притягиваются, а затем возвращаются в исходное положения. Сила притяжения [2]

$$F = \frac{I^2 \mu_0 dl}{2\pi(a + \delta)}, \tag{1}$$

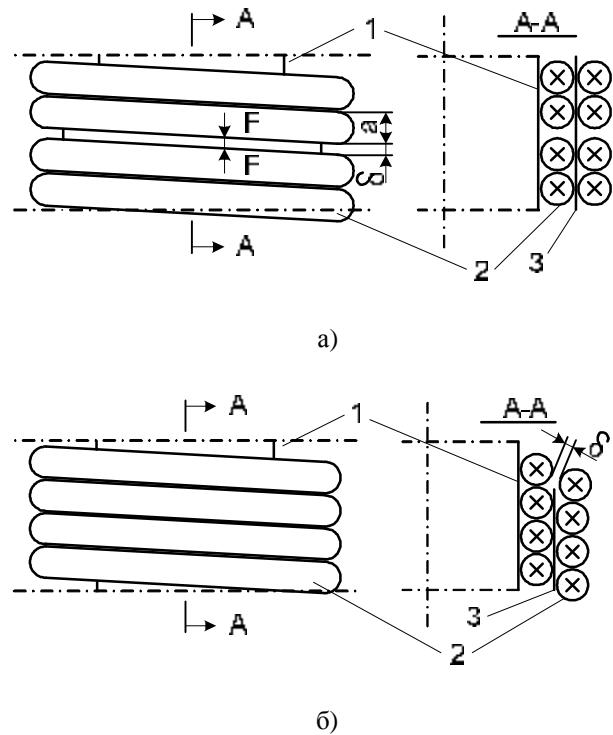


Рисунок 1 – Образование вибрационных зазоров при намотке катушки:

- а) в средней части;
- б) в торце при переходе одного слоя к другому:
- 1 – каркас катушки; 2 – витки провода;
- 3 – междуслойная изоляция

где μ_0 – магнитная проницаемость воздуха, которую можно считать равной $4\pi \times 10^{-7}$ Гн/м, dl – длина элемента проводника, a – расстояние между осями проводников, δ – зазор между витками. Частота вибрации – $2f = 100$ Гц (рис. 2).

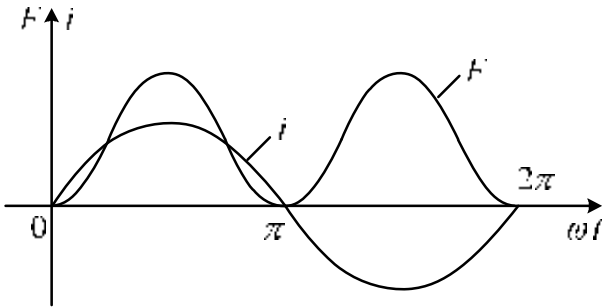


Рисунок 2 – Кривые тока в витках обмотки и силы притяжения витков F

Длину dl можно принять равной 0,5 от расстояния между точками фиксации витков. При таком размещении трение возможно как витков между собой, так и о витки предыдущего и последующего слоев обмотки.

2. Неблагоприятными являются крайние витки: при переходе от одного слоя к другому провода пересекаются (рис. 1,б), и поэтому трение может возникнуть в месте их соприкосновения – обычно это наиболее уязвимая (подверженная пробой) часть обмоток. Междуслойная изоляционная прокладка не всегда разделяет крайние витки, потому что при намотке она часто сдвигается в среднюю часть катушки, как показано на рис. 1,б.

Вибрационному износу изоляции способствует повышенная температура: ресурс изоляции уменьшается с ее ростом [3]. Поэтому вибрационный пробой чаще возникает в тех местах катушки, которые имеют более высокую температуру, – обычно в средних.

3. Отрицательно на стойкость изоляции влияет некачественная пропитка. В асинхронных двигателях небольшой мощности (до 60 кВт) в статорах применяют круглый провод марки ПЭВ (ПЭТВ). Статорные обмотки изготавливают отдельно и затем укладывают в пазы [4]. Проводники после укладки оказываются расположенными в пазу хаотически: возможно сочетание факторов, способствующих максимальной вибрации, например, если виток окажется одиночным. Изучение причин выхода из строя асинхронных двигателей после ремонта (на одном из предприятий г. Кременчуга) показало, что основная причина этого – пробой статорных обмоток. Причем пробой наступает уже через 3÷4 месяца после ремонта двигателя. Пропитка статорной обмотки в ходе ремонта выполняется способом погружения в ванну с лаком [4]. При этом возможно образование “мешков”, когда лак в некоторые зоны не проникает. Вибрация “одиночных” проводников в зоне “мешков” приводит к быстрому перетиранию их изоляции. Однако от вибрации лак может разрушиться и в зоне пропитанных витков [5].

Сложность исследования вибрационного износа изоляции – в необходимости проведения длительных экспериментов: срок службы изоляции в нормальных условиях – десятки лет, поэтому для

проведения экспериментов необходимы сопоставимые затраты времени, а это в лабораторных условиях неприемлемо. Необходимы ускоренные испытания. Они возможны при воздействии на исследуемый объект повышенных уровней факторов, называемых факторами форсировки [1]. Ими в нашем случае могут быть: амплитуда вибрации, давление на изоляцию, температура. Если установить амплитуду вибрации в 20 раз большую, чем фактическая, то при линейной зависимости износа от амплитуды разрушение изоляции наступит в 20 раз быстрее. Фактор форсировки в этом случае по амплитуде $K_A = 20$. Если одновременно увеличить силу давления в 5 раз, то фактор форсировки по давлению $K_F = 5$. Тогда коэффициент ускорения износа

$$K_y = K_A \times K_F = 100.$$

Если при испытаниях на стенде с $K_y = 100$ изоляция разрушилась через час, то фактическая стойкость изоляции при работе в естественных условиях – 100 часов. Обычно зависимость ускорения износа зависит от коэффициента в нелинейной степени, например, от температуры она логарифмическая [3]. Кроме того, износ зависит от сочетания факторов форсировки. Это учитывает теория испытания электрических машин на надежность [1], например, при двух факторах форсирования –

$$K_y = b_0 + \sum b_i x_i + \sum b_{ij} x_i x_j + \sum b_{ij} x_i^2, \quad (2)$$

где b_0 , b_i , b_{ij} , – коэффициенты.

Для разработки уравнений регрессии (2) необходимы экспериментальные исследования. С этой целью на кафедре “Электрические машины и аппараты” КГПУ были разработаны и изготовлены испытательные стенды: один из них – для определения стойкости изоляции в зависимости от факторов форсировки (при трении иглы о провод) (рис. 3,а и б), а второй – для испытаний, близких к естественным (при взаимном трении проводов).

В стенде (рис. 3) воздействие на изоляцию выполняется с помощью скребковой иглы диаметром $0,4 \pm 0,6$ мм, которая прилегает к проводу с давлением F и совершает движения влево-вправо с частотой 60 ± 2 в минуту. После повреждения изоляции цепь провод-игла замыкается и срабатывает сигнализация. Испытания изоляции с помощью иглы общеприняты [2]. Стойкость изоляции определяется по числу движений иглы до момента разрушения изоляции. Этот принцип использован в стенде (рис. 3): изолированный провод 1 расположен в верхней части, снизу к нему прилегает скребковая игла 2, прикрепленная к якорю 3 электромагнита с сердечником 4 и обмоткой 5. После подключения обмотки к напряжению переменного тока якорь вибрирует, приводя в движение иглу. Амплитуду вибрации можно регулировать путем

изменения напряжения питания катушки. Давление провода на иглу выполняется с помощью пружины 6.

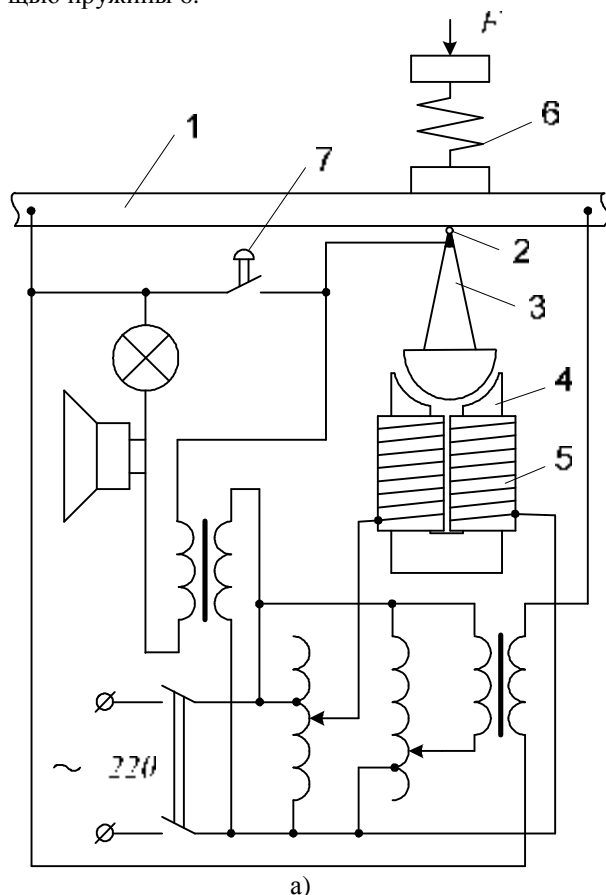


Рисунок 3 – Стенд для исследования изоляции на вибрационную прочность при помощи скребковой иглы:
а) схема электрическая; б) фото стенда

Силу давления можно регулировать и измерять. По испытуемому проводнику от вторичной обмотки трансформатора протекает ток, чем можно изменять температуру провода. Кнопка 7 предназначена для проверки работы цепи сигнализации. При измерении времени износа изоляции один и тот же эксперимент выполняется 4 раза. Максимальное и минимальное значения не учитывались. За истинное T принималось среднее между двумя оставшимися. На рис. 4 приведено фото проводника с поврежденной на стенде изоляцией.



Рисунок 4 – Провод с изоляцией, поврежденной скребковой иглой

Стенд (рис. 3) позволяет выполнять ускоренные испытания за счет форсировки вибрации по амплитуде, давлению и температуре. Задавая различные значения факторов форсировки можно за непродолжительное время – в сотни раз меньше, чем фактическое, – достигнуть разрушения изоляции – для различных сечений и марок проводов. Например, для провода ПСДК сечением 5 мм^2 при температуре 50°C такие данные приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Стойкость изоляции в зависимости от амплитуды вибрации и давления

Давление иглы на изоляцию $F, \text{ Н}$	Стойкость изоляции $T, \text{ мин}$ при амплитудах вибрации $A=0,1 \div 2 \text{ мм}$				
	0,1	0,2	0,5	1	2
0,2	85	71	57	32	22
0,5	55	52	40	25	15
1	42	35	31	22	9
2	27	22	18	12	4
5	17	12	7	3,5	1,5

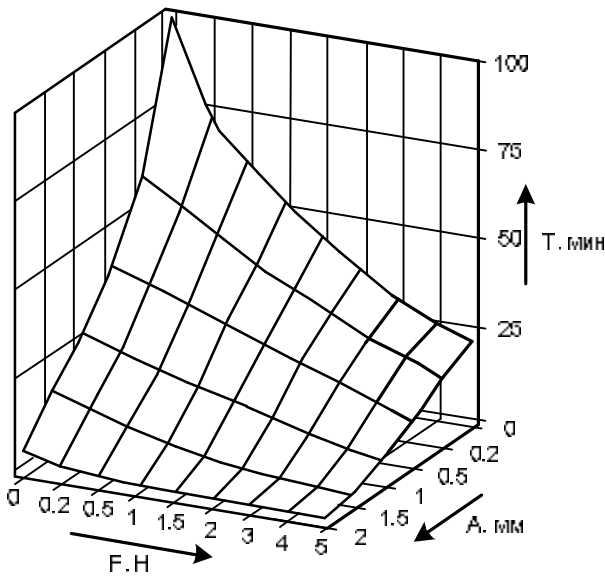
На рис. 5 по данным таких таблиц построены трехмерные зависимости стойкости изоляции T в функциях амплитуды и давления для температур $50, 70$ и 90°C .

С помощью данных таблицы и трехмерных зависимостей можно определить коэффициенты уравнений регрессии, коэффициент ускорения и далее рассчитать фактический срок службы изоляции. Порядок расчета может быть следующим:

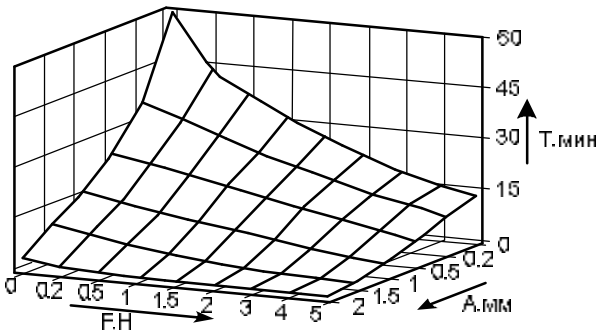
1. Определяем амплитуду вибрации, давление на изоляцию и температуру провода (A_n, F_n и $T_n^\circ\text{C}$) при номинальных условиях эксплуатации для данного устройства. Такие данные должны быть сняты предварительно и приведены в справочниках.

2. Выбираем факторы форсировки (рекомендуется в пределах до 20 [1]). Умножив значения факторов на данные, приведенные в п.1, определяем величины амплитуды вибрации, давления и температуры, при которых проводились ускоренные испытания.

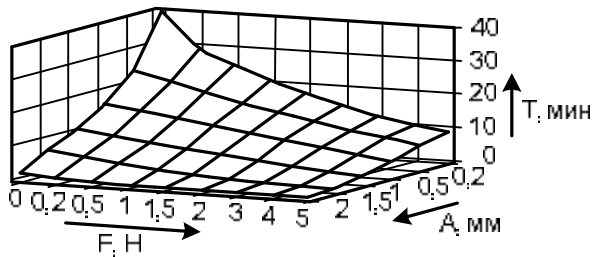
3. Используя результаты вычислений по п. 2, определяем по таблицам или трехмерным зависимостям стойкость изоляции с учетом коэффициентов форсировки.



а)



б)



в)

Рисунок 5 – Трехмерные зависимости стойкости изоляции при температуре: а) 50°C; б) 70°C; в) 90°C

4. Составляем уравнение регрессии, вычисляем коэффициенты (методика изложена в [6]) и определяем коэффициент ускорения K_y износа изоляции при принятых коэффициентах форсировки.

5. Путем умножения стойкости изоляции (п. 3) на коэффициент ускорения, находим время износа изоляции при номинальных условиях эксплуатации.

По приведенной методике был определен срок службы изоляции провода вторичной обмотки сварочного трансформатора, по которой протекает переменный ток 500А; провод обмотки – ПСД сечением $4 \times 10 \text{ мм}$, $dl = 5 \times 10^{-2} \text{ м}$. Сила притяжения между витками (1):

$$F = \frac{500^2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 5 \cdot 10^{-2}}{2\pi \cdot 10 \cdot 10^{-3}} = 0,25 \text{ Н}.$$

Была измерена амплитуда вибрации, которая составила 0,1 мм. Если выбрать коэффициент форсировки по амплитуде $K_A = 10$ ($A = 1 \text{ мм}$), а по давлению – 2, то на пересечении строки $F = 0,25 \cdot 2 = 0,5 \text{ Н}$ и колонки $A = 0,1 \cdot 10 = 1 \text{ мм}$ (табл. 1) получим $T = 25 \text{ мин}$. Температура при работе сварочного аппарата была равной 80°C. Коэффициент форсировки по температуре при ее превышении в два раза примем равным 8 [3].

Составим уравнение регрессии и определим коэффициент ускорения K_y . Пусть он оказался 300. Тогда,

$$T = 300 \cdot 25 = 7500 \text{ мин} = 125 \text{ час}.$$

При одноосменной работе и ПВ=60% изоляция разрушится через 1,5÷2 месяца. Сварщики хорошо знают, что если на катушке сварочного аппарата появится виток с вибрацией, то сварочный аппарат выйдет со строя очень скоро. Необходима пропитка и крепление.

Для приближения исследований к естественным условиям был разработан и изготовлен второй стенд (рис. 6,а, б и в). Стенд состоит из ферромагнитного сердечника 1 с катушкой 2, которая подключена ко вторичной обмотке понижающего трансформатора 3. Обмотка содержит один или несколько витков с пересечением проводов по образцу рис. 1,б. Натяжение провода с пересекающимся витком можно регулировать с помощью винта 4 и измерять динамометром 5. В результате вибрации в точке касания проводов происходит ускоренный износ изоляции. Скорость износа зависит от тока, величину которого можно регулировать с помощью автотрансформатора 3 и понижающего трансформатора 7, силы давления верхнего витка на нижний и от температуры. После повреждения изоляции часть витков катушки 2 оказываются замкнутыми накоротко, в результате чего сила тока увеличивается, реле тока 6 срабатывает, замыкая сигнальную цепь.

Испытания на втором стенде более длительны, поскольку факторы форсировки незначительны, однако условия износа изоляции близки к естественным: вибрация обоих витков происходит под воздействием протекающего по ним тока.

Стенд (рис. 6) в настоящее время используется нами для исследований, в частности, вибрационного износа изоляции проводников в пазу статора АД: один из проводников обмотки натягивается с помощью динамометра 5 и располагается рядом с пучком остальных витков. Изменяя давление одиночного проводника на другие провода пучка, а также силу тока и температуру, можно определять износ изоляции путем измерений и фотографирования. Данная работа в настоящее время на стадии выполнения.

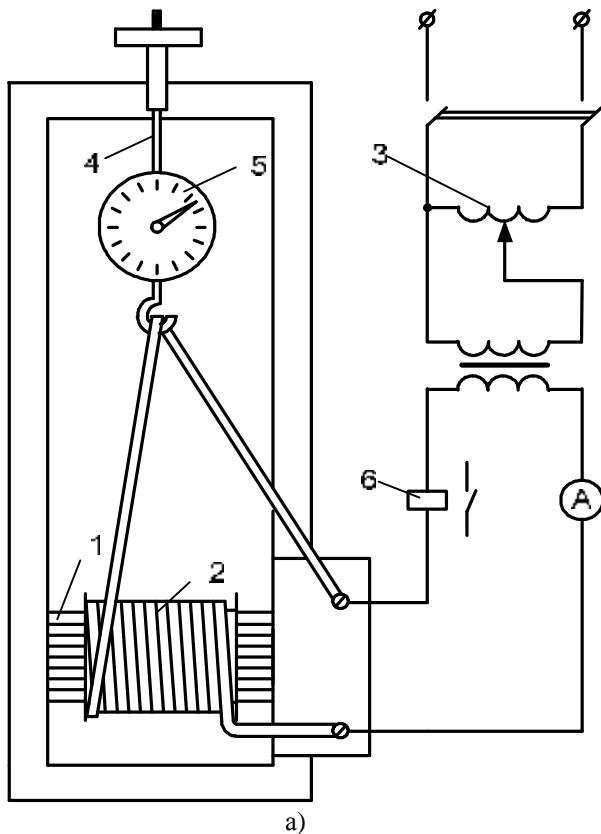


Рисунок 6 – Стенд для исследования изоляции на вибростойкость при непосредственном трении двух проводов:
а) схема электрическая;
б) фото стенда для катушки;
в) фото стенда для секции статора АД

Датчики тока, давления, температуры и срабатывания реле подключены к компьютеру.

Выводы. Описаны схемные и конструктивные решения вибростендов для исследования стойкости изоляции обмоточных проводов от действия вибрации, вызванной протекающими по ним токов. Для ускорения проведения экспериментов выбраны три фактора форсировки: амплитуда вибрации, давление скребковой иглы на изоляцию и температура. Предложен способ расчета вибрационной стойкости изоляции в зависимости от коэффициентов ускорения и полученной стойкости при совместном действии двух или трех факторов. Сняты экспериментальные зависимости стойкости изоляции при различных амплитудах вибрации, давления скребковой иглы на изоляцию и температуры. Построены трехмерные зависимости срока службы изоляции от амплитуды, давления и температуры. Предложен способ определения стойкости изоляции при расчете трансформаторов и электродвигателей. Чтобы будущие специалисты знали о влиянии вибрации на повреждение изоляции, можно рекомендовать ввести в учебные планы выполнение соответствующей лабораторной работы и расчет вибростойкости изоляции обмоток при выполнении курсовых работ и проектов.

Зависимости позволяют прогнозировать стойкость изоляции при различных условиях эксплуатации. По результатам расчета можно оценить износ изоляции от действия различных факторов и заблаговременно принять меры по уменьшению вибрационного воздействия на изоляцию – как при ремонте трансформаторов и электродвигателей, так и при их производстве.

БІБЛІОГРАФІЧНІ ДАНІ

1. Котеленец Н.Ф., Кузнецов Н.П. Испытания и надежность электрических машин. – М.: Высшая школа, 1988. – 232 с.
2. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. М.: Высшая школа, 1967. – 775 с.
3. Пешков И.Б. Обмоточные провода. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 350 с.
4. Антонов М.В., Герасимов Л.С. Технология производства электрических машин. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 512 с.
5. Черный А.П. Определение снижения ресурса асинхронных двигателей по показателям качества преобразования энергии// Техніка в сільськогосподарському виробництві. Вип. 15. –Кіровоград, 2004.
6. Корятин А.М. Автоматизация типовых технологических процессов и установок: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 432с.

Статья поступила 19.02.2007
Рекомендовано к печати к.т.н, доц.
Некрасов А.В