

ИСПЫТАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ИМПУЛЬСОМ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Leavitt Randy Keener, ведущий специалист
Компания Baker Instrument, SKF Group Company

На протяжении длительного времени производители электродвигателей, компании, занимающиеся ремонтом электрических машин, и специалисты по надежности электрических машин обсуждают достоинства испытания электрических машин импульсом высокого напряжения. Вопросы о преимуществах и результатах испытания стали темой бурных обсуждений на многих предприятиях. Одни полагают, что сам процесс обнаружения пробоев в изоляции электрических машин путем проведения испытания импульсом высокого напряжения разрушает диэлектрическую изоляцию. Другие уверены, что испытание высоким напряжением абсолютно необходимо для проверки изоляции.

Так что же на самом деле? Может ли проводимое должным образом испытание импульсом высокого напряжения помочь производителям обеспечить надежность электрических машин и значительно сократить потери от брака?

Далее будут приведены теоретические аспекты, объекты применения, эффективность проведения испытаний импульсом высокого напряжения и результаты таких испытаний. Эта информация, возможно, уменьшит количество споров и обсуждений данного вопроса.

Теоретические аспекты испытания импульсом высокого напряжения

Испытания на сопротивление изоляции, испытание высоким напряжением и испытание на определение индекса поляризации – все они проводятся в целях выявления проблем пробоя (утечки) корпусной изоляции на землю, а испытанием импульсом высокого напряжения проверяется состояние изоляции между витками, слоями и фазами в обмотках электрических машин. Главная цель испытания импульсом высокого напряжения – выявление ослабления изоляции, которые невозможно было обнаружить при других высоковольтных испытаниях. Повреждение изоляции обмоток электродвигателей обычно впоследствии становится причиной пробоев корпусной изоляции, что зачастую может привести к катастрофическим результатам. Проблемы с межвитковой изоляцией определенно выявляются при испытании импульсом высокого напряжения.

Такое импульсное испытание выполняется путем пропускания через испытываемую обмотку быстро нарастающего импульса высокого напряжения, в результате чего осуществляется распределение падений напряжения по всей обмотке. Если изоляция между витками, слоями или фазами ослаблена, а напряжение при этом достаточно высокое, то между проводами будет искрение. Это искрение отражается на экране как изменение кривой формы волны импульса по отношению к заданной форме.

Импульсное испытание обмотки проводится при помощи высоковольтного импульсного генератора (в составе тестера). Импульсный генератор по сути является большой емкостью в контуре этой модели, а катушка – по сути является индуктором. Эти два элемента составляют резонансный LC контур. Отражением этого импульса на экране будет затухающая синусоида.

Резонансная частота (f – “Frequency”) пропорциональна квадратному корню индуктивного сопротивления обмотки и емкости импульсного генератора и рассчитывается по формуле:

$$\omega = 2\pi f = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$Frequency = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

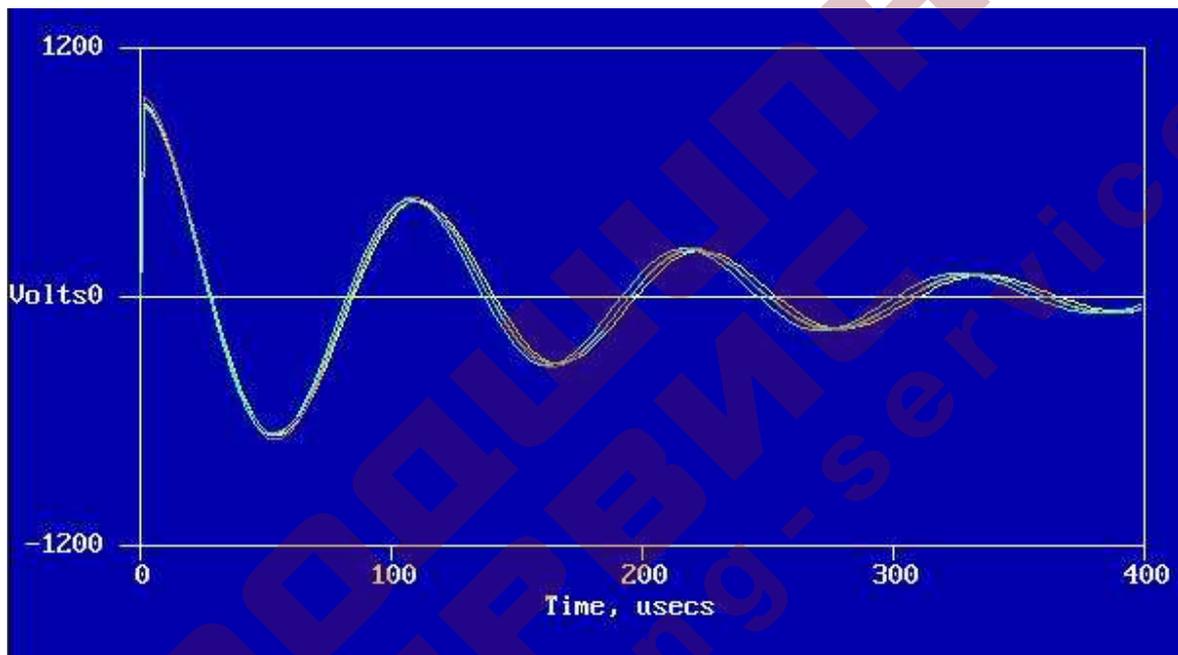


Рис.1. Типовые формы кривых обмоток 3-х фазного электродвигателя при импульсных испытаниях.

Индуктивное сопротивление обмотки определяется ее геометрией (количеством витков, зоной размещения катушки, и т.д.) и магнитной проводимостью железного сердечника. Пробои (утечки) в межвитковой изоляции уменьшают индуктивное сопротивление обмотки, в результате чего наблюдается результирующий сигнал в виде затухающей синусоиды с более высокой частотой и с меньшей амплитудой формы волны.

Обычно при импульсном испытании проводится сравнение сигналов испытуемой (неизвестной по качеству) обмотки с результирующим сигналом заведомо исправной (эталонной) катушки. Кривая формы волны обмотки с подобным индуктивным сопротивлением и не имеющей замкнутых витков подобна соответствующему сигналу заведомо исправной обмотки. Обмотка с иным индуктивным сопротивлением (или же имеющая замкнутые витки) имеет форму волны отличную от формы волны заведомо исправной катушки.

История развития импульсных испытаний

Импульсные испытания катушек электродвигателей вошли в промышленную практику с 1926 года, с момента опубликования статьи Джона Л. Райландера “Испытание изоляции вращающейся электрической машины импульсом высокого напряжения” в сборнике *Американского Института Инженеров-Электриков*. До 1926 года признаком ослабления межвитковой изоляции был спад амплитуды напряжения катушки. Эта амплитуда определялась с помощью стенда очень большого размера, имеющего в составе поворотный электроискровой разрядник для переключений, выпрямитель с электровакуумной лампой и большие повышающие трансформаторы для зарядки крупных высоковольтных конденсаторов.

В 1950-х годах такой метод испытаний импульсом напряжения все еще считался достаточно современным. На фирме Вестингауз были разработаны приборы, в которых использовался метод сравнения форм волны. На таких приборах одновременно испытывались импульсом две обмотки, а их сигналы одновременно отражались на экране электронно-лучевой трубки. Это упростило испытание, сделав его более практичным для применения в производстве. Однако, приборы все еще были дорогостоящими и большими по размеру.



Рис.2. Фотография стенда для проведения испытаний импульсом (июль 1951).

После 1950 года в высоковольтных испытаниях был замечен прогресс. Расширение рынков и развитие технологий электронной промышленности оказали положительное влияние на производство испытательного оборудования и достижение значительных высот в модернизации, надежности и чувствительности тестеров. Продвинутые тестеры стали оснащаться современной электроникой. Тяжелые мощные трансформаторы в них заменяются на полупроводниковые

высоковольтные источники питания, что привело к значительным улучшениям их конструкции и к портативности. Тестовое оборудование, которое раньше весило более 500 кг, теперь весит всего 20 кг. Тестеры стали многофункциональными – испытания импульсом совмещаются с другими видами испытаний для полной оценки состояния изоляции обмоток. Таковыми являются: определение сопротивления обмотки, сопротивления изоляции, обнаружение утечки заряда на землю, определение индекса поляризации, испытание на диэлектрические потери, на образование коронного разряда и т.д. Испытания управляются микропроцессором, что позволяет оценивать состояние обмоток, не подвергая опасности диэлектрическую целостность изоляции.

Идеология устаревшего метода испытания сравнением импульсов (при котором обмотка сравнивается с эталонной обмоткой) был усовершенствован. В современных тестерах отражение импульса напряжения исправной обмотки уже переводится в цифровую форму и сохраняется. Сигналы испытуемых обмоток сравниваются с оцифрованной формой волны. При обнаружении пробоев испытание прекращается, сохраняя диэлектрическую целостность. Это дает прибору возможность обнаруживать неисправности без вмешательства оператора, что обеспечивает высокий уровень повторяемости. Данные записываются и сохраняются в базе данных для будущей работы.

На сегодняшний момент испытание импульсом высокого напряжения универсально и применяется в производстве электродвигателей, катушек, датчиков и обмоток всех типов для определения качества изоляции. Производители электрических машин и компании, занимающиеся их ремонтом, проводят импульсные испытания, чтобы убедиться в качестве изоляции обмоток.

В многочисленных программах по предупредительному ремонту импульсное испытание применяется, как способ определения качества изоляции ответственных электрических машин, установленных на различных заводах, шахтах, предприятиях нефтепереработки и т.п.. В процессе эксплуатации диэлектрическая прочность изоляции в течение срока службы постепенно снижается (старение изоляции). Факторы, отрицательно сказывающиеся на качестве изоляции, включают в себя периодическое изменение температуры, вибрацию, сгибание катушки из-за воздействия электромагнитного поля 50/60 Гц, воздействие химических веществ, частичного разряда, перепады высокого напряжения, истирание из-за загрязняющих частиц. Для операторов электрических машин важно быть уверенными в надежности их изоляции, что является залогом поддержания нормального и продуктивного процесса эксплуатации. Импульсное испытание, выполненное должным образом, помогает убедиться в прочности изоляции, являясь наиболее простым и быстрым способом подтверждения работоспособности электродвигателя.

Требования к выполнению испытание импульсом должным образом

В целях получения эффективного результата импульсного испытания, следует понять и уделить особое внимание некоторым его моментам. Во-первых, должно быть известно рабочее напряжение испытуемого двигателя. Во-вторых, оператор, проводящий испытание, должен понимать процедуру его проведения и использовать соответствующее испытательное напряжение. На некоторых промышленных предприятиях процедуры проведения импульсного испытания записываются в обязательные стандарты предприятия. В таблице ниже указаны испытательные напряжения для электродвигателей нового и находящегося в эксплуатации оборудования.

Таблица 1: Рекомендуемые испытательные напряжения

V _{линии}	На изделие	IEEE522 Новые, импульс 3.5 на ед	IEEE522 В состоянии 75%новых	EASA При об- служивании	EASA В состоянии 65%новых	IEC34-15 1.2 x импульс 4E+5000V	IEC34-15 0.2 μs 6 4E+5000V	Baker В состоянии 2E+1000V
480	392	3700	2800	1960	2165	6920	4498	1960
575	469	3700	2800	2150	2375	7300	4745	2150
600	490	3700	2800	2200	2431	7400	4810	2200
2300	1878	6573	4930	5600	6188	14200	9230	5600
4160	3397	11888	8916	9320	10298	21640	14066	9320
6900	5634	19718	14789	14800	16354	32600	21190	14800
13800	11268	39437	29578	28600	31603	60200	39130	28600

То минимальное напряжение, при котором в искровом промежутке наблюдается появление искр, называется «Минимум Пашена». На графике изображено значение напряжения (постоянного тока – пиковая величина переменного тока) в зависимости от величины искрового промежутка при стандартной температуре и давлении и однородности поля. Минимальное напряжение приблизительно составляет 330 вольт постоянного тока. График объясняет, почему высоковольтное испытание необходимо для определения пробоя изоляции. При более низком напряжении искрения не будет.

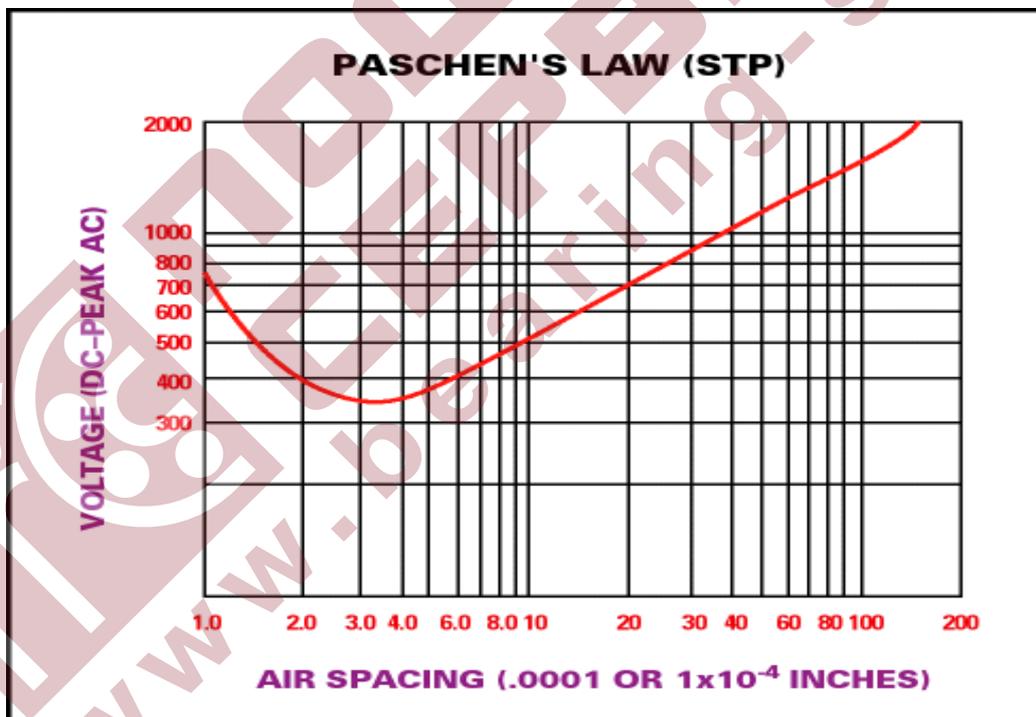


Рис.3. Иллюстрация к закону Пашена

Отказ электродвигателя.

При контроле качества изоляции электродвигателей рассматриваются два типа изоляционных систем: корпусная изоляция (между электрическими элементами электрической машины и землей) и изоляция между витками, слоями и фазами. При нормальном состоянии изоляции электродвигатель может выдержать ежедневные перепады напряжения, возникающие при его запуске и остановке. Однако, со временем изоляция «старее».

В 1987 году, группа специалистов (Гупта, Ллойд, Стоун, Кэмпбел, Шарма, Нильсон) опубликовала для Института Инженеров Электротехники и Электроники статью «Преобразование энергии», основываясь на опыте 3-х летней эксплуатации электродвигателей на электростанции. Они сделали вывод, что электродвигатели получают в среднем 3 импульса напряжения во время запуска при нормальной эксплуатации. Некоторые электродвигатели могут получать в среднем до 4.6 импульсов напряжения. Формула для расчета величины напряжения (для трехфазных систем) на изделие следующая:

$$1 p.u. = \sqrt{\frac{2}{3}} \times V_{line} = \text{Maximum voltage with respect to ground in a 3-phase system.}$$

$p.u.$ = на единицу

V_{line} = напряжение линии

На графике ниже проиллюстрирован пробой в системе изоляции электродвигателя. Если электродвигатель новый, диэлектрическая прочность изоляции электродвигателя должна превышать перепады, возникающие при нормальной его эксплуатации. Со временем диэлектрическая прочность изоляции электродвигателя снижается и может стать ниже уровня амплитуд перепада напряжения. Затем наблюдается резкое снижение прочности изоляции. В момент достижения диэлектрической прочности изоляции уровня рабочего напряжения происходит ее пробой и отказ электродвигателя.

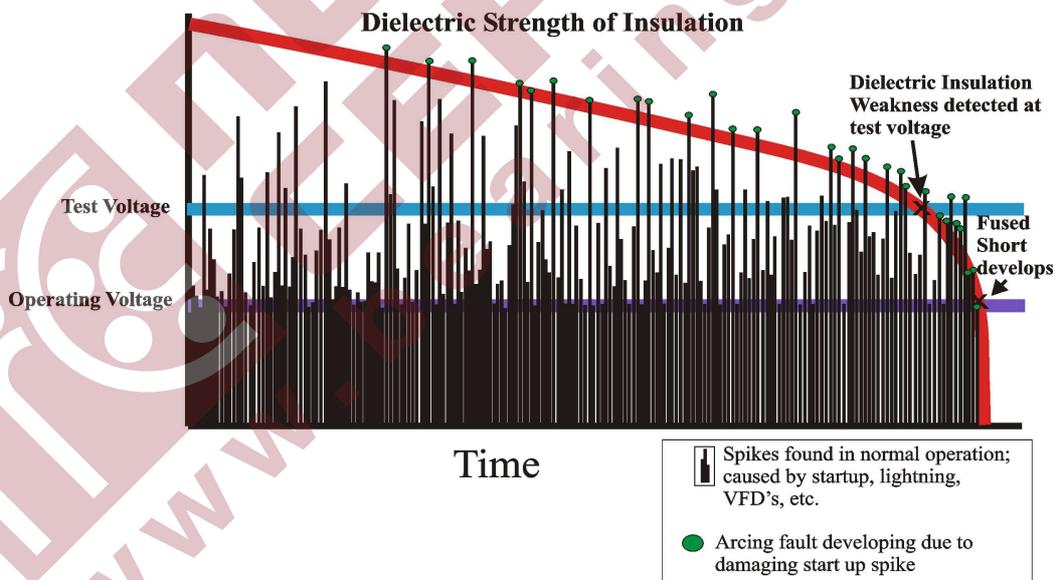


Рис 4. Иллюстрация нарушения диэлектрической прочности изоляции обмоток во времени.

Высоковольтные испытания новых электродвигателей подтверждают, что диэлектрическая прочность системы изоляции электродвигателя превышает минимальное напряжения питания. При периодических высоковольтных испытаниях во время диагностического обслуживания выявляются электродвигатели с изоляцией, величина сопротивления которой понизилась до уровня возможного пробоя. Такие электродвигатели лучше было бы отремонтировать или заменить во время запланированного их отключения при диагностике, чем дожидаться незапланированного отключения электродвигателя из-за пробоя изоляции во время его эксплуатации.

В статье “Переходные модели для асинхронных машин с межвитковым замыканием в обмотке статора”, авторы Рангараджан Таллам, Томас Габельтер и Рональд Харли установили, что межвитковое замыкание в обмотке статора асинхронной машины приводит к прохождению тока большой величины по замкнутым виткам – порядка двукратного тока короткозамкнутого ротора. Если такое замыкание не было обнаружено вовремя, то оно начинает далее распространяться по другим виткам, приводя к замыканиям между фазой и землей и замыканиям между фазами. Ток замыкания на землю приносит непоправимый ущерб статору, что, возможно, может привести и к выходу машины из строя вообще. Поэтому раннее обнаружение витковых замыканий является очень важным, так как благодаря этому можно не только избежать опасных условий работы оборудования, но и исключить его возможный отказ и последующий простой по этой причине.

Преимущества современных методов испытаний импульсом.

С 1961 года компания Baker Instrument Company занимается производством высоковольтных тестеров для испытания электрических обмоток. В первоначальных испытательных приборах применялась методика сравнения сигналов различных обмоток, но и сегодня этот метод испытания продолжает применяться. Обычно, при испытании методом сравнения сигналов обмотки двух фаз трехфазного электродвигателя одновременно испытываются и затем сравниваются. Данный метод позволяет определить такие отклонения между фазами, как замыкания, обрывы и противоположное направление намотки катушек. В программном обеспечении цифровых приборов для испытания импульсом напряжения компанией Baker Instrument при автоматическом сравнении сигналов фаз учитывается Коэффициент оценки погрешности по площадям между формами кривых – “Line-Line Error Area Ratio (L-L EAR)”. Сигнал каждой фазы оцифровывается при запрограммированном испытательном напряжении. Общая площадь, заключенная между кривыми отражения сигнала различных фаз рассчитывается математически для того, чтобы оценить – имеется ли какое-либо отклонение параметров форм волны обмоток какой-либо фазы, недопустимое для дальнейшей эксплуатации оборудования.

Однако, имелись и определенные положительные достижения в испытательных методах и анализе формы волны, позволившие усовершенствовать методику импульсного испытания. Одним из таких достижений является учет в программе тестеров Коэффициента оценки погрешности по площадям, заключенным между формами кривых при различных импульсах – “Pulse-Pulse Error Area Ratio (P-P EAR)”. При помощи P-P EAR, компании Baker Instrument удалось проводить более точный математический анализ формы волны достаточный для распознавания даже самых незаметных на глаз отличий в процессе тестирования обмоток при медленном повышении испытательного напряжения до максимального уровня, тем самым повысить класс точности собственно тестера. Программа тестера обеспечивает постепенное повышение испытательного напряжения маленькими шагами по фазе на каждый раз. С помощью

Коэффициента «P-P EAR» с ростом напряжения программа тестера проводит математический расчет погрешности площадей между формами кривых отражения импульсов напряжения при сравнении форм волны отражения следующих друг за другом импульсов напряжения. При этом, если изменения частоты формы кривой выходят за пределы установленного допуска, испытание автоматически остановится. Этим самым предотвращается последующий рост испытательного напряжения, потенциально способствующий повреждению изоляции. Этот технический прием очень полезен при проведении планово-предупредительного ремонта.

Для иллюстрации эффективности Коэффициента «P-P EAR», в качестве примера на дисплее отображены результаты испытания электродвигателя оборудования производства бумаги. Отказ данного электродвигателя был зафиксирован при импульсном испытании второй фазы его обмотки при напряжении 4.760 вольт. Ориентировочное испытательное напряжение было установлено на 5.600 вольт. При дальнейшем рассмотрении диалогового окна Коэффициента «PP-EAR» в % можно четко увидеть изменения в частоте сигнала, значительно превышающего запрограммированный предел в 10%. На этой стадии тестер автоматически прекращает испытание, сообщая пользователю о проблеме. Прочие испытания, выполняемые с данным электродвигателем, включают в себя: определение сопротивления обмотки, сопротивления изоляции, индекса поляризации и испытание высоким напряжением. Ни одно из этих испытаний не может определить наличие пробоя фазной изоляции. Опыты же показали, что отказы практически у 80% электродвигателей начинаются с появлением проблем изоляции между витками обмоток.

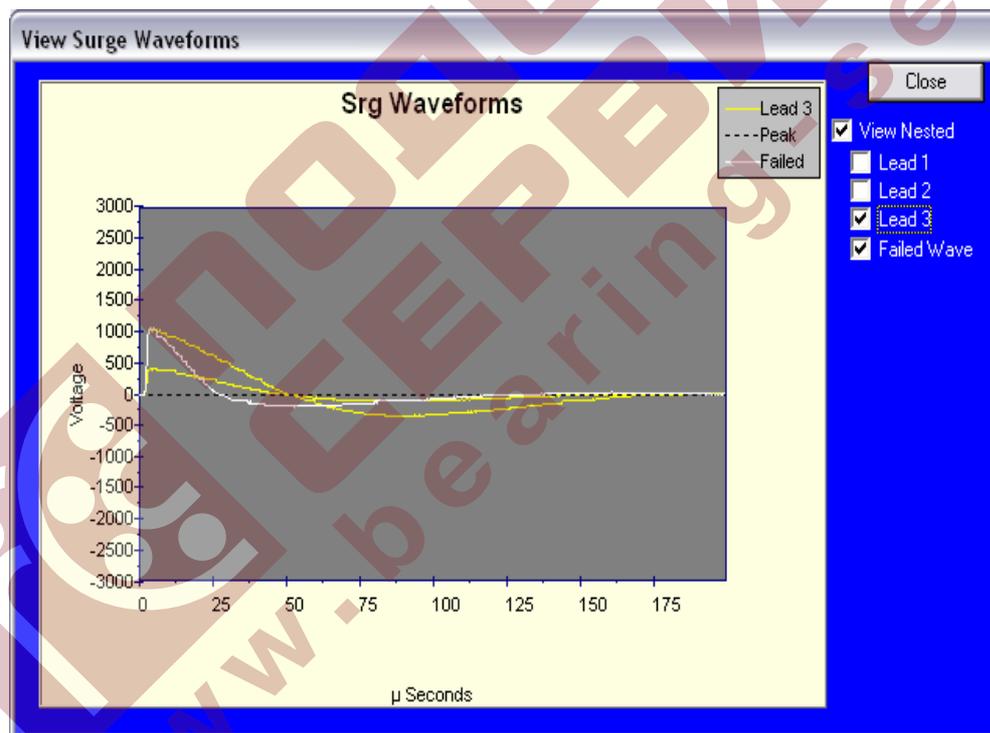


Рис 5. Резкое изменение частоты, вызванное искрением при небольшом повышении напряжения.

Заключение.

Импульсное испытание обмоток электродвигателей является наиболее эффективным средством для обнаружения проблем межвитковой изоляции на ранней стадии. Проводя это испытание, обслуживающий персонал имеет возможность своевременно осуществить ремонт или замену электродвигателей с нарушенной изоляцией, благодаря чему экономятся средства. Многочисленные эксперименты с обмотками и постоянный опыт применения такого типа испытания на практике доказали, что при импульсном испытании обмоток изоляция не разрушается.

С течением времени оборудование и процесс импульсного испытания существенно изменились. В 1926 году, когда Дж. Л. Райландер представил общему вниманию методику этого испытания, испытательное оборудование было тяжелым и громоздким. Сегодня же применяемые приборы портативны и управляются компьютером, просты в применении и обладают высокой точностью, благодаря чему результаты испытаний становятся более информативными, корректными, и получаются быстро автоматическим способом.



ПОДШЕВНИК
СЕРВИС
www.bearing-service.ru