

## ДИАГНОСТИКА ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Юрий Михайлович Помогаев, кандидат технических наук,  
доцент кафедры электрификации сельского хозяйства  
Владимир Владимирович Картавец, кандидат технических наук,  
зав. кафедрой электрификации сельского хозяйства  
Игорь Вячеславович Лакомов, кандидат технических наук,  
доцент кафедры электрификации сельского хозяйства

Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I

DOI: 10.17238/issn2071-2243.2016.1.98

Проведены исследования процессов, протекающих в изоляции при прохождении по ней тока различного рода. Объектом исследования являются различные схемы замещения изоляции, предметом исследований – закономерности протекания электродинамических процессов в изоляции электрических машин. При подаче напряжения на изоляцию возникает сквозной ток, потому что в диэлектриках присутствуют свободные заряды. В результате этого наблюдается замедленная поляризация. Это есть смещение и поворот соединенных дипольных молекул, которые создают ток абсорбции. Далее происходит быстрая поляризация, в результате чего возникает ток смещения. При анализе данных процессов и схем замещения было выявлено, что ток абсорбции уменьшается, а сквозной ток остается неизменным. Ток смещения присутствует очень маленькое время, и его не учитывают при расчетах. Значения этих токов и мощности потерь зависят от качества изоляции, и поэтому они являются основными диагностическими параметрами. В качестве вспомогательных параметров диагностики используются характеристики электрической прочности. Анализируя состояние изоляции электрической машины, необходимо соблюдать правила техники безопасности и последовательность проведения измерений: а) поочередно измерять каждую независимую цепь, остальные цепи должны быть соединены с корпусом машины; б) соединение с корпусом каждой цепи должно быть не менее чем на 15 секунд для электромашин до 1000 кВт. Увлажненность и состояние изоляции определяются несколькими способами: а) по значению  $K_{аб.}$ ; б) по отношению емкостей при различных частотах тока; в) по отношению приращения емкости к основной емкости; г) по значению тангенса угла диэлектрических потерь  $tg\delta$ . Применение рассмотренных выше методов диагностирования изоляции позволяет эффективно и рационально эксплуатировать электрооборудование на предприятиях агропромышленного комплекса.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** сопротивление изоляции, коэффициент абсорбции, диэлектрические потери, мегаомметр, схема замещения.

The authors have studied the electromagnetic processes occurring in the insulation during the flow of different currents. The object of this study included different equivalent circuits of insulation. The subject of research was the regularities of electrodynamic processes in the insulation of electrical machines. It was found that when the insulating material was under the electric field, through-current was generated, because free charges were present in the dielectrics. This results in slow polarization, which is a displacement and rotation of dipole molecules that create absorption current. Then rapid polarization occurs, which results in displacement current. Having analyzed these processes and equivalent circuits, the authors have identified that the absorption current decreased, and the through-current remained unchanged. Displacement current is present for a very short time and is not counted. The values of these currents and power losses depend on the quality of insulation and therefore are the main diagnostic parameters of insulation. Additional diagnostic parameters are the characteristics of electric strength. When analyzing the condition of insulation of an electrical machine it is necessary to follow the safety rules and sequence of measuring that can be summarized as follows: a) the measurements should be performed alternately for each electrically independent circuit, while all other circuits should be connected with the machine body; b) each circuit should be connected to the machine body for at least 15 seconds for machines up to 1000 kW. Moisture and insulation condition can be determined by several ways: a) by the value of the absorption coefficient  $K_{ab}$ ; b) by the ratio of capacities at different current frequencies; c) by the ratio of capacity increment to basic capacity; d) by the value of the dielectric loss tangent  $tg\delta$ . Application of the abovementioned techniques for diagnosing insulation allows for effective and reasonable operation of electric equipment in agricultural enterprises.

**KEY WORDS:** insulation resistance, absorption coefficient, dielectric losses, megohmmeter, equivalent circuit.

**С**опротивление изоляции (далее по тексту  $R_{из.}$ ) представляет собой очень изменчивую величину и не является параметром электрической машины, а только показывает состояние изоляции в данное время. Измерение сопротивления нужно для

проверки возможности испытания электрической машины без риска ее повреждения. Наименьшее значение  $R_{из.}$  не может быть оценено с помощью определенных критериев.  $R_{из.}$  очень сильно меняется в процессе работы и зависит в основном от двух факторов – температуры и влажности, которые снижают ее значение, и если температуру можно измерить, то влажность не поддается количественной оценке, а качественная оценка влажности есть измеренный результат. Измерять можно мегаомметром, который состоит из источника питания постоянного напряжения и других элементов. Сравнивая  $R_{из.}$  обмоток в процессе работы, можно судить о допустимой ее величине. Допустимая температура, при которой проводятся измерения, должна иметь одинаковое значение:  $T_1 = T_2 = \dots = T_n$ , где  $n$  – очередной номер измерения, время измерения должно быть равно одной минуте [4, 5, 6, 9].

При снижении сопротивления изоляции более чем на 30%, по сравнению с предыдущим, оно считается недопустимым. Величина сопротивления изоляции, измеряемая при температуре 75°C, должна быть больше, чем определенная по выражению (1), но не менее 0,5 МОм

$$R_{из.} = \frac{U_{ном}}{1000 + P/100}, \quad (1)$$

где  $U_{ном}$  – напряжение электрооборудования, В;  
 $P$  – мощность, кВт.

Это значит, что при температуре электрооборудования 20°C  $R_{из.}$  должно быть более 4,7 МОм. Для этого необходимо сделать приведение допустимого значения  $R_{из.}$  (0,5 МОм) при 75°C к температуре 20°C. Это можно сделать с помощью коэффициентов, приведенных в таблице 1.

Таблица 1. Коэффициенты приведения  $R_{из.}$  к одной температуре

Разность температур	5	10	15	20	25	30	35	40
Коэффициент приведения	1,23	1,50	1,80	2,25	2,75	3,40	4,15	5,10

Находим разность температур:  $75 - 20 = 55^\circ\text{C}$ . Если она более 40°C, определяем значение коэффициентов приведения из таблицы 1 и принимаем два или более коэффициента. В данном случае температуру 55°C делим на две части – 25°C и 30°C, для первой температуры коэффициент приведения 2,75, для второй – 3,40. Общий коэффициент будет равен 9,35. Тогда  $R_{из.}$  при 20°C будет равно 4,7 МОм. В другом примере измерения проводились при 20°C и  $R_{из.}$  было равно 0,5 МОм. Для этого случая  $R_{из.}$  при 75°C будет равно 0,053 Мом, это меньше допустимого значения. Приблизительная оценка  $R_{из.}$  для 75°C возможна при помощи следующего правила: при измерении  $R_{из.}$  ниже рабочей температуры его нужно увеличивать на каждые 20°C разности между рабочей температурой и температурой, при которой выполнялись измерения [1, 2].

Например: при температуре 20°C  $R_{из.}$  равно 4,8 МОм. Температура обмотки равна 75°C, разность температур  $\Delta T = 75 - 20 = 55^\circ\text{C}$ . По правилу в этом значении находятся 2 полные или 3 неполные температуры по 20°C ( $20 + 20 + 15 = 55$ ). Исходя из этого полученный результат измерения равен

$$R_{пр.из.} = \frac{R_{20^\circ\text{C}}}{2 \times 2 \times 2} = \frac{4,8}{2 \times 2 \times 2} = 0,6 \text{ МОм}. \quad (2)$$

Для более полного понимания, почему измерения  $R_{из.}$  выполняются по предлагаемой методике, рассмотрим схемы замещения, представленные на рисунках 1-3.

Согласно методике, измеряя  $R_{из.}$  одной фазы, необходимо заземлить две другие фазы. На рисунке 1 показана схема замещения электрической изоляции.

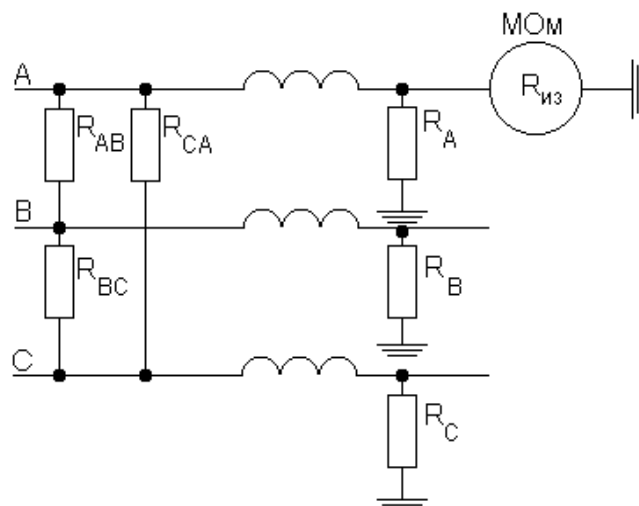


Рис. 1. Схема замещения электрической изоляции

При измерении  $R_{из}$  фазы "А", заземлив при этом фазу "С", мы видим, что схема, приведенная на рисунке 1, изменилась (рис. 2).

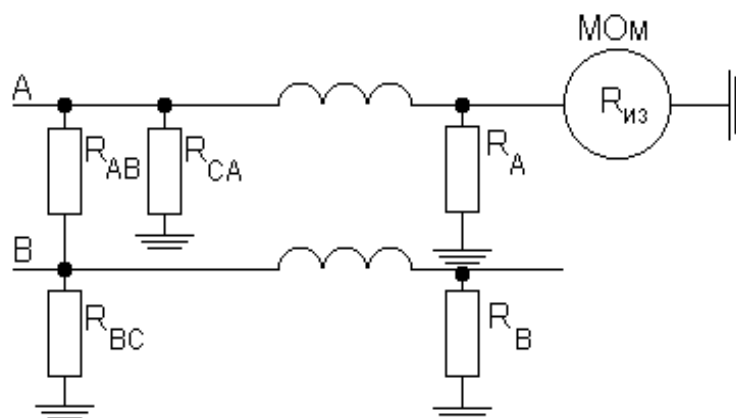


Рис. 2. Схема замещения электрической изоляции при заземленной фазе "С"

Для схемы, показанной на рисунке 2, составляем эквивалентную схему замещения, которая позволяет очень удобно проводить расчеты (рис. 3).

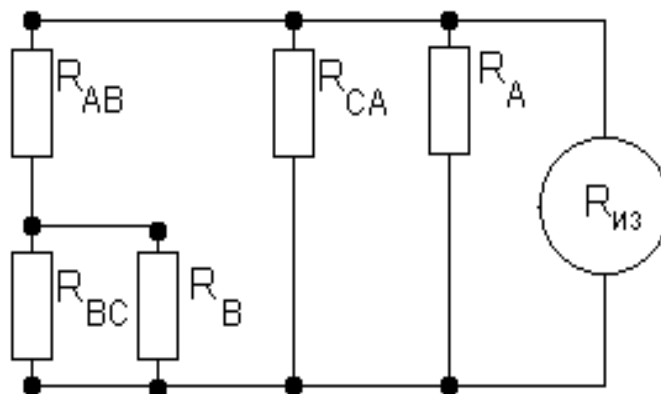


Рис. 3. Схема замещения с эквивалентным сопротивлением

Записываем значение эквивалентного сопротивления для данной схемы:

$$R_9 = \frac{R_A \times R_{AC} \times (R_B \times R_{BC} + R_{AB} \times R_{BC} + R_B \times R_{AB})}{(R_A + R_{AC}) \times (R_B \times R_{BC} + R_{AB} \times R_{BC} + R_{AB} \times R_B) + R_A \times R_{AC} \times (R_B + R_{BC})} . \quad (3)$$

Анализируя полученное выражение, определяем, когда оно равно 0.

Такое условие будет соблюдаться, когда выражение в числителе будет равно нулю:  $R_A \times R_{AC} \times (R_B \times R_{BC} + R_{AB} \times R_{BC} + R_B \times R_{AB}) = 0$ , и соответственно, когда равны нулю  $R_A$  и  $R_{AC}$ . Равенство нулю выражения за скобками будет только в том случае, если одновременно будут равны нулю  $R_B$  и  $R_{BC}$ .

Если только  $R_B = 0$ , тогда

$$R_9 = \frac{R_A \times R_{AC} \times R_{AB} \times R_{BC}}{(R_A + R_{AC}) \times R_{AB} \times R_{BC} + R_A \times R_{AC} \times R_{BC}} . \quad (4)$$

Если только  $R_{AB} = 0$ , тогда

$$R_9 = \frac{R_A \times R_{AC} \times R_B \times R_{BC}}{(R_A + R_{AC}) \times R_B \times R_{BC} + R_A \times R_{AC} \times (R_B + R_{BC})} . \quad (5)$$

Если только  $R_{BC} = 0$ , тогда

$$R_9 = \frac{R_A \times R_{AC} \times R_B \times R_{AB}}{(R_A + R_{AC}) \times R_{AB} \times R_B + R_A \times R_{AC} \times R} . \quad (6)$$

Данные выражения говорят о том, что по результатам измерений можно сделать ошибочные выводы и допустить наличие неисправности (пробита изоляция на корпус в фазе "В", см. выражение (4), и  $R_{из.}$  между фазами "А" и "В" и "В" и "С" равно нулю, см. выражения (5) и (6). Принимая, что у электромашин с нормальным  $R_{из.}$  сопротивления  $R_A = R_{AC} = R_B = R_{BC} = R_{AB} = R$ , справедливы следующие выражения:

$$R_9 = \frac{3}{8} \times R \quad \text{или} \quad R = \frac{8}{3} \times R_9 = 2,7R_9 . \quad (7)$$

Значит, измеряя  $R_{из.}$  одной фазы, мы определяем эквивалентное  $R_{из.}$  других фаз относительно корпуса. Для правильного вывода о состоянии параметров изоляции электрической машины нужно соблюдать два правила:

- 1) последовательность измерений должна сохраняться для каждой независимой цепи, остальные цепи должны соединяться с корпусом;
- 2) соединение цепей с корпусом электромашин должно быть по времени более 15 секунд при мощности до 1000 кВт, не менее 60 секунд при мощности более 1000 кВт и более 180 секунд при применении мегаомметра на 2500 В [1, 2].

Степень увлажнения и состояние изоляции определяются следующими методами:

- по значению  $K_{аб.}$ ;
- по отношению  $C_2/C_{50}$ ;
- по отношению  $\Delta C/C$ ;
- по значению тангенса угла диэлектрических потерь  $tg\delta$ .

Рассмотрим эти методы подробнее.

Проверка увлажнения изоляции по значению коэффициента абсорбции заключается в следующем. Увлажненность изоляции связана с продолжительностью стабилизации показаний мегаомметра при измерении ее сопротивления. Это время тем больше, чем меньше увлажнена изоляция.

При оценке увлажненности изоляции этот метод является основополагающим и называется методом коэффициента абсорбции.  $K_{аб.}$  есть отношение двух сопротивлений  $R_{60}$  и  $R_{15}$

$$K_{аб.} = \frac{R_{60}}{R_{15}} . \quad (8)$$

Изоляция считается влажной, если  $K_{аб.} < 1,3$ . При  $K_{аб.} > 1,3$  изоляция сухая. Физика процесса объясняется различным временем разряда емкости абсорбции у сухой и влажной изоляции [3].

Далее рассмотрим метод определения влажности изоляции, который называют «емкость – частота». Он основан на том, что емкость сухой изоляции при изменении частоты фактически не меняется в отличие от влажной. Измерение емкости проводят при частоте 2 Гц и 50 Гц. Измеряя емкость изоляции на частоте 50 Гц, мы видим только геометрическую емкость, которая имеет одинаковое значение у сухой и влажной изоляции, при измерении емкости на частоте 2 Гц начинает проявляться емкость абсорбции влажной изоляции, в сухой изоляции она имеет меньшее значение, и из-за этого изоляция заряжается медленнее. Схема измерения емкостей  $C_2$  и  $C_{50}$  при помощи прибора ПКВ-7А представлена на рисунке 4.

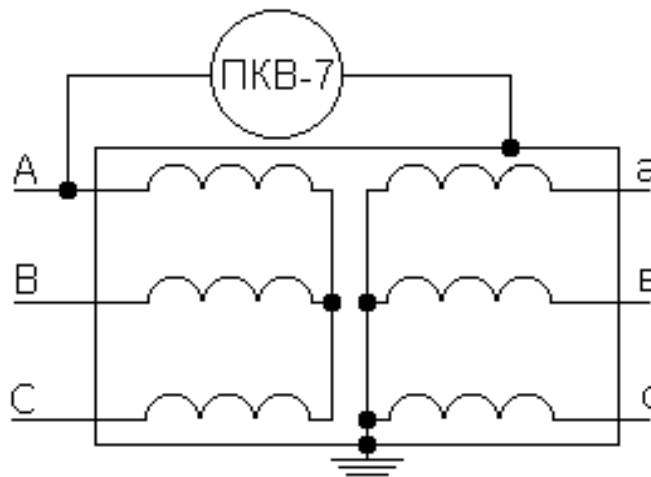


Рис. 4. Измерение влажности изоляции при помощи прибора ПКВ-7А

Если полученное в процессе измерения отношение емкостей на различных частотах соответствует данному выражению  $C_2/C_{50} = 2$ , то изоляция считается влажной, а если это отношение равно 1, то изоляция сухая. Данный метод применяется для электрических машин, заполненных маслом. Для измерения применяются приборы типа ПКВ. Использовать прибор контроля влажности нужно при сопротивлении изоляции более 14 МОм и температуре от 9 до 32°C. При нарушении этих условий ошибка измерений может быть более 10% [7].

Определять влажность изоляции также можно по приросту емкости за 1 секунду ( $\Delta C/C$ ). Для этого нужно зарядить изоляцию, а затем при ее разряде измерить емкость объекта "С" и прирост емкости " $\Delta C$ " в течение одной секунды за счет емкости абсорбции, которая проявляет себя за 1 секунду у влажной изоляции и не проявляет у сухой. Отношение  $\Delta C/C$  является функцией температуры и позволяет характеризовать увлажненность изоляции. Данная методика применяется для контроля влажности изоляции у электрических машин, которые не заполняют маслом [7].

Другой характеристикой состояния изоляции является мощность, которая рассеивается в проводах, или пропорциональный этой мощности тангенс угла диэлектрических потерь. Векторная диаграмма, характеризующая положение вектора тока утечки и вектора напряжения, показана на рисунке 5.

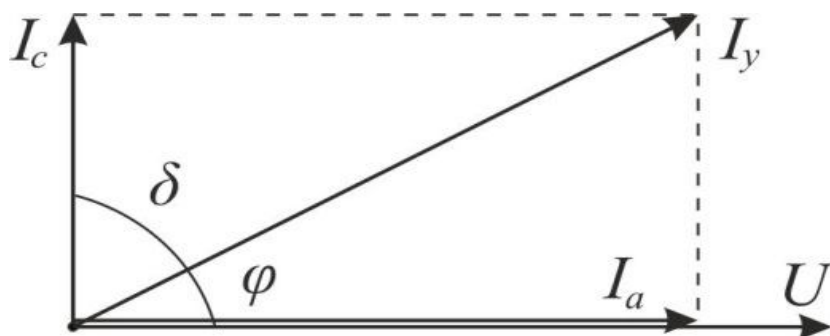


Рис. 5. Диаграмма векторов токов утечки увлажненной изоляции

Отношение активного тока утечки  $I_a$  к его реактивной составляющей  $I_c$  и есть тангенс угла диэлектрических потерь  $\operatorname{tg}\delta = I_a/I_c$ , емкостной ток

$$I_c = U/X_c = U \cdot \omega \cdot C, \quad (9)$$

где  $\omega$  – угловая частота,  $2\pi f$ ;

$C$  – емкость конденсатора;

$U$  – напряжение, В.

Потери мощности в конденсаторе из-за токов утечки:

$$P = U \times I_a = U \times I_c \times \operatorname{tg}\delta = \omega \times C \times U^2 \times \operatorname{tg}\delta = K \times \operatorname{tg}\delta, \text{ т.е. } P = \operatorname{tg}\delta.$$

Из этого можно сделать вывод, что мощность, теряемая на ток утечки через изоляцию, пропорциональна  $\operatorname{tg}\delta$ . По активному току  $I_a$  нельзя говорить о потерях, так как он является функцией геометрии образца изоляции. Отношение активного тока утечки к емкостному ( $I_a/I_c$ ) имеет функциональную зависимость от величины  $R_{\text{из.}}$ . Для измерения  $\operatorname{tg}\delta$  применяются мосты МД-18, Р-526 и другие мостовые приборы.

Этот метод дает возможность определять прочность изоляции, отсутствие местных дефектов, не найденных другими способами [4]. Для устройств, работающих при высоких напряжениях до 35 кВ включительно, рекомендуется испытывать изоляцию высоким напряжением. Значения испытательных напряжений приведены в таблице 2.

Таблица 2. Значения испытательных напряжений

Номинальное напряжение, кВ	до 0,69	3,0	6,0	10,0	15,0	20,0	35,0
Испытательное напряжение, кВ	4,5÷2,7	16,2÷9,0	22,5÷15,4	31,5÷21,6	40,5÷33,3	49,5	76,5

Применяют следующие виды испытаний:

1) главная изоляция обмоток трансформаторов проверяется повышенным напряжением относительно корпуса и другой обмотки (ВН и НН);

2) изоляции витков испытываются повышенным напряжением.

Главную изоляцию испытывают в условиях эксплуатации. Ток в этом случае должен быть с частотой 50 Гц, температура изоляции при испытаниях равна температуре окружающей среды, время испытаний 60 секунд. В течение этого времени испытательное напряжение не оказывает влияния на состояние изоляции без дефектов, однако можно проверить изоляцию, находящуюся под напряжением. Напряжение, которое подают на обмотку в начале испытания, должно быть в три раза меньше испытательного ( $0,33U_{\text{исп}}$ ). Скорость нарастания может быть различной. После этого испытательное напряжение

плавно повышают со скоростью, которая допускает наблюдение за приборами. После окончания испытаний его плавно снижают до 30% от испытательного и отключают. При испытаниях используют специальные разрядники, которые защищают объекты от повышенного напряжения [8].

Применение рассмотренных выше методов диагностирования изоляции позволяет эффективно и рационально эксплуатировать электрооборудование на предприятиях агропромышленного комплекса, достигая при этом минимума приведенных затрат на производство единицы товарной продукции.

---

### Список литературы

1. Афанасьев Н.А. Система технического обслуживания и ремонта оборудования энергохозяйств промышленных предприятий : учеб. для вузов / Н.А. Афанасьев, М.А. Юсипов. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
2. Ерошенко Г.П. Эксплуатация энергооборудования сельскохозяйственных предприятий : учебник для вузов / Г.П. Ерошенко, Ю.А. Медведько, М.А. Таранов. – Ростов-на-Дону : Терра, 2001. – 451 с.
3. Помогаев Ю.М. Надежность систем электроснабжения : учебник для вузов / Ю.М. Помогаев, В.В. Картавцев, В.И. Серебровский. – Воронеж : ФГБОУ ВПО Воронежский ГАУ, 2014. – 143 с.
4. Помогаев Ю.М. Эксплуатация электрооборудования на предприятиях агропромышленного комплекса : учебник для вузов / Ю.М. Помогаев, Г.А. Пархоменко, Г.В. Коробов. – Воронеж : Изд-во ФГБОУ ВПО Воронежский ГАУ, 2013. – 414 с.
5. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей РД153-34.0-03-2003 утв. М-вом энергетики Рос. Федерации 13.01.03. Введ. с 22.01.03. – Москва : Энергосервис, 2003. – 386 с.
6. Пястолов А.А. Эксплуатация и ремонт электроустановок : учебник для вузов / А.А. Пястолов. – Москва : Колос, 1983. – 326 с.
7. Пястолов А.А. Эксплуатация электрооборудования : учебник для вузов / А.А. Пястолов, Г.П. Ерошенко. – Москва : Агропромиздат, 1990. – 287 с.
8. Сырых Н.Н. Эксплуатация электрооборудования сельскохозяйственных предприятий : учебник для вузов / Н.Н. Сырых. – Москва : Агропромиздат, 1986. – 296 с.
9. Таран В.П. Справочник по эксплуатации электроустановок : справочник / В.П. Таран, В.К. Андриец, А.В. Синельник ; под ред В.П. Тарана. – Москва : Колос, 1983. – 221 с.