

## ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ ПО ПАРАМЕТРАМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В НЕЙ

Гребченко Н.В.

Донецкий государственный технический университет  
grebchenko@pandora.kita.dgtu.donetsk.ua

*The method of detection of the electrical insulation failures in the cable-motor circuit is concerned in the article. For that the constant voltage is supplied to one of the phases, time constant of charge is defined and then time constant of discharge is defined and voltage between cable phases is measured during selfdischarge of the cable phase capacities. The results of calculations on the mathematical model are shown.*

Причиной повреждений в системе собственных нужд электрических станций наиболее часто является ухудшение состояния изоляции присоединений 6 кВ (кабель-двигатель или кабель-трансформатор 6/0,4 кВ). Поэтому выявление зарождающихся повреждений в двигателях и питающих их кабелях, является актуальной проблемой. Зачастую качество изоляции оценивается только по величине ее сопротивления, что не позволяет выявлять повреждения, не сопровождающиеся снижением ее сопротивления. Однако известны методы, позволяющие более полно оценивать качество изоляции благодаря дополнительному контролю ее емкости при подаче постоянного напряжения [1] или напряжения различной частоты [2]. Оценивание технического состояния обмотки электрической машины может выполняться по переходному процессу, возникающему при подаче тестового сигнала на один из зажимов обмотки и корпус [3]. В системе собственных нужд (с.н.) электрических станций целесообразно указанные методы применить не отдельно для кабеля и двигателя, а одновременно для всего электрического присоединения, включающего кабель и питаемый объект (двигатель, трансформатор). В этом случае при диагностировании отпадает необходимость выполнять измерения отдельно для кабеля и двигателя и отключать кабель в коробке выводов обмоток двигателя.

В данной статье рассматривается методика оценки состояния электрической изоляции присоединений с.н. по величине постоянной времени цепи заряда и постоянной времени цепи разряда емкостей фаз изоляции по отношению к земле при подаче постоянного тестового напряжения. Постоянная времени заряда в основном определяется величиной емкости изоляции и почти не зависит от ее сопротивления. В то же время скорость разряда зависит не только от емкости, но и от сопротивления изоляции. Вместе с тем, следует иметь в виду, что шунтирующее влияние сопротивлений изоляции других фаз присоединения не позволяет непосредственно определять искомые постоянные. Таким образом, указанные постоянные позволяют одновременно контролировать изменение емкости и сопротивления изоляции, которые происходят вследствие ухудшения ее состояния.

Диагностика изоляции присоединения по предлагаемому методу выполняется следующим образом. Схема проведения измерений для оценки состояния изоляции приведена на рисунке 1. После отключения выключателя  $Q$  присоединения в его ячейке на одну из фаз от постороннего источника подается тестовое постоянное напряжение порядка 2000-2500 В. С помощью цифрового регистратора с большим входным

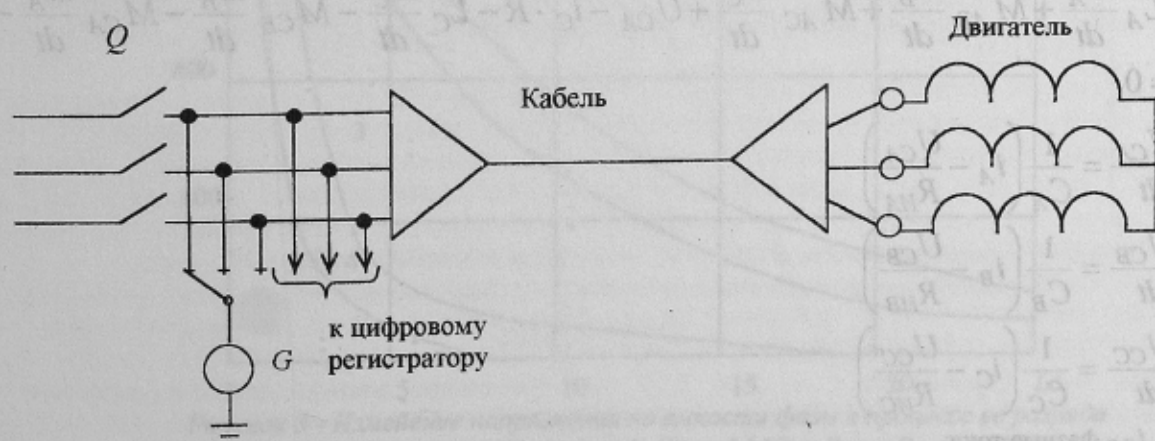


Рисунок 1- Схема проведения измерений при диагностике присоединения

сопротивлением (не менее 20 МОм) фиксируется процесс достижения напряжением на двух других фазах установившегося значения. Затем фиксируются напряжения в процессе саморазряда емкости изоляции, который начинается после отключения источника тестового напряжения. На основании полученных данных определяются постоянные времени заряда и разряда для каждой фазы. При этом учитываются внутренние сопротивления источника тестового напряжения и цифрового регистратора. Значительное отличие величины постоянных времени по фазам или величин, определяемых ими, указывает на наличие повреждения изоляции

или на начало процесса развития в ней дефекта. Для косвенного выявления различия в постоянных времени используется появление высокочастотной составляющей или напряжения между фазами.

Для проведения анализа переходных процессов при выполнении оценки изоляции разработана математическая модель присоединения кабель-двигатель. Ниже приведена схема замещения присоединения с.н. (рисунок 1). На ее основании составлена математическая модель.

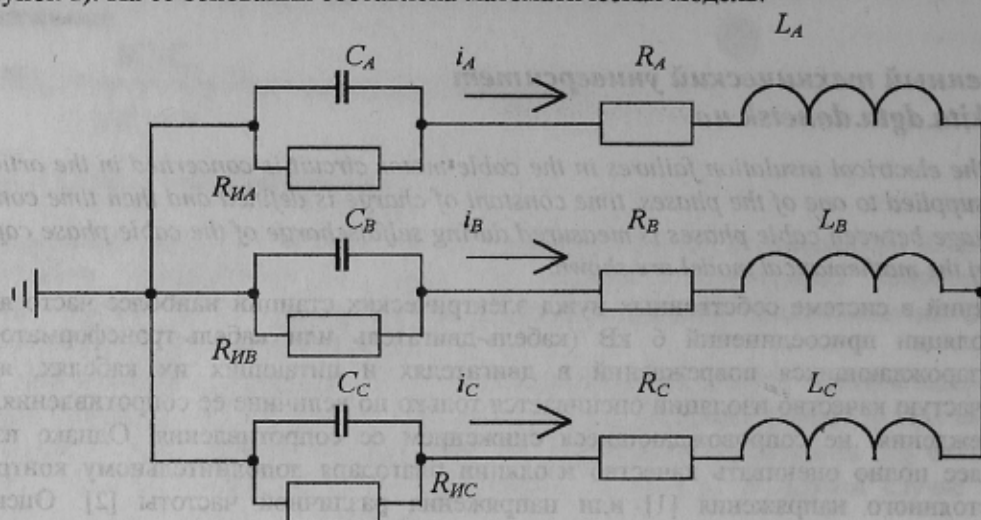


Рисунок 2- Схема замещения присоединения кабель-двигатель.

При составлении математической модели присоединения кабель-двигатель приняты следующие допущения. Трехфазная электрическая цепь является симметричной, т. е. сопротивления жил кабеля и обмоток двигателя во всех трех фазах равны. Не учитываются межфазные емкости, токи намагничивания, нелинейность сопротивления двигателя и емкость обмоток двигателя. Предполагается, что на данном этапе моделирования допустимо пренебречь параметрами изоляции обмоток двигателя, а кабель рассматривать как линию с сосредоточенными параметрами.

Дифференциальные уравнения для независимых контуров схемы замещения присоединения:

$$i_A \cdot R + L_A \frac{di_A}{dt} + M_{AB} \frac{di_B}{dt} + M_{AC} \frac{di_C}{dt} + U_{CA} - i_B \cdot R - L_B \frac{di_B}{dt} - M_{BA} \frac{di_A}{dt} - M_{BC} \frac{di_C}{dt} - U_{CB} = 0 \quad (1)$$

$$i_B \cdot R + L_B \frac{di_B}{dt} + M_{BA} \frac{di_A}{dt} + M_{BC} \frac{di_C}{dt} + U_{CB} - i_C \cdot R - L_C \frac{di_C}{dt} - M_{CB} \frac{di_B}{dt} - M_{CA} \frac{di_A}{dt} - U_{CC} = 0 \quad (2)$$

$$i_A \cdot R + L_A \frac{di_A}{dt} + M_{AB} \frac{di_B}{dt} + M_{AC} \frac{di_C}{dt} + U_{CA} - i_C \cdot R - L_C \frac{di_C}{dt} - M_{CB} \frac{di_B}{dt} - M_{CA} \frac{di_A}{dt} - U_{CC} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{dU_{CA}}{dt} = \frac{1}{C_A} \left( i_A - \frac{U_{CA}}{R_{ИА}} \right) \quad (4)$$

$$\frac{dU_{CB}}{dt} = \frac{1}{C_B} \left( i_B - \frac{U_{CB}}{R_{ИВ}} \right) \quad (5)$$

$$\frac{dU_{CC}}{dt} = \frac{1}{C_C} \left( i_C - \frac{U_{CC}}{R_{ИС}} \right) \quad (6)$$

где  $i_A, i_B, i_C$  - фазные токи;

$U_{CA}, U_{CB}, U_{CC}$  - напряжения на емкостях фаз А, В и С;

$R$  - суммарное активное сопротивление фазы жилы кабеля и фазы обмотки двигателя;

$L_A, L_B, L_C$  - индуктивность фаз обмоток двигателя;

$M_{AB}, M_{AC}, M_{BC}$  - коэффициенты взаимной индукции фаз обмоток двигателя;

$R_{ИА}, R_{ИВ}, R_{ИС}$  - сопротивления изоляции фаз А, В, С.



Если в дифференциальных уравнениях (1-6) принять, что  $M_{AB}=M_{AC}=M_{BC}=M_{BA}=M_{CA}=M_{CB}=M$ , а  $L_A=L_B=L_C=L$ , и затем заменить  $L-M=L'$ , то после преобразования система дифференциальных уравнений принимает вид:

$$\frac{di_A}{dt} = -\frac{R}{L'} \cdot i_A + \frac{1}{3L'} (U_{CB} + U_{CC} - 2U_{CA}); \quad \frac{di_B}{dt} = -\frac{R}{L'} \cdot i_B + \frac{1}{3L'} (U_{CA} + U_{CC} - 2U_{CB})$$

$$\frac{di_C}{dt} = -\frac{R}{L'} \cdot i_C + \frac{1}{3L'} (U_{CA} + U_{CB} - 2U_{CC})$$

$$\frac{dU_{CA}}{dt} = \frac{1}{C_A} \left( i_A - \frac{U_{CA}}{R_{IA}} \right); \quad \frac{dU_{CB}}{dt} = \frac{1}{C_B} \left( i_B - \frac{U_{CB}}{R_{IB}} \right); \quad \frac{dU_{CC}}{dt} = \frac{1}{C_C} \left( i_C - \frac{U_{CC}}{R_{IC}} \right)$$

В качестве примера выполнена серия расчетов переходных процессов для присоединения состоящего из кабеля длиной 1 км и асинхронного электродвигателя мощностью 500 кВт. В расчетах приняты следующие параметры схемы замещения:  $R=10$  Ом;  $C_A=C_B=C_C=0,3 \cdot 10^{-6}$  Ф;  $L=0,06$  Гн;  $R_{IA}=R_{IB}=R_{IC}=10^6$  Ом.

По результатам расчетов с использованием приведенной математической модели получены следующие результаты. Характер процесса саморазряда емкостей фаз кабеля определяется параметрами двух контуров: первого- $RLC$  и второго- $R_{II}C$ . Если изоляция трех фаз имеет одинаковое состояние, т.е. емкости фаз изоляции равны и равны сопротивления изоляции по фазам, то саморазряд емкостей происходит индивидуально по фазам. При этом емкость каждой фазы разряжается через сопротивление изоляции  $R_{II}$  этой же фазы, постоянные времени разряда равны по фазам, ток в жилах кабеля отсутствует, а поэтому междуфазные напряжения равны нулю (рис.3, кривая 1).

В случае снижения сопротивления изоляции одной из фаз при разряде емкости появляется ток разряда в фазах кабеля и обмотках двигателя(рис.4). В начальный момент (около 0,1 с) в токах и напряжениях на емкостях возникает периодическая составляющая. Частота колебаний зависит от индуктивности двигателя и емкости изоляции присоединения, что позволяет также ее использовать для оценки качества изоляции. Далее процесс разряда происходит аperiodически. Скорость затухания периодической составляющей целесообразно использовать для контроля состояния обмоток электродвигателя.

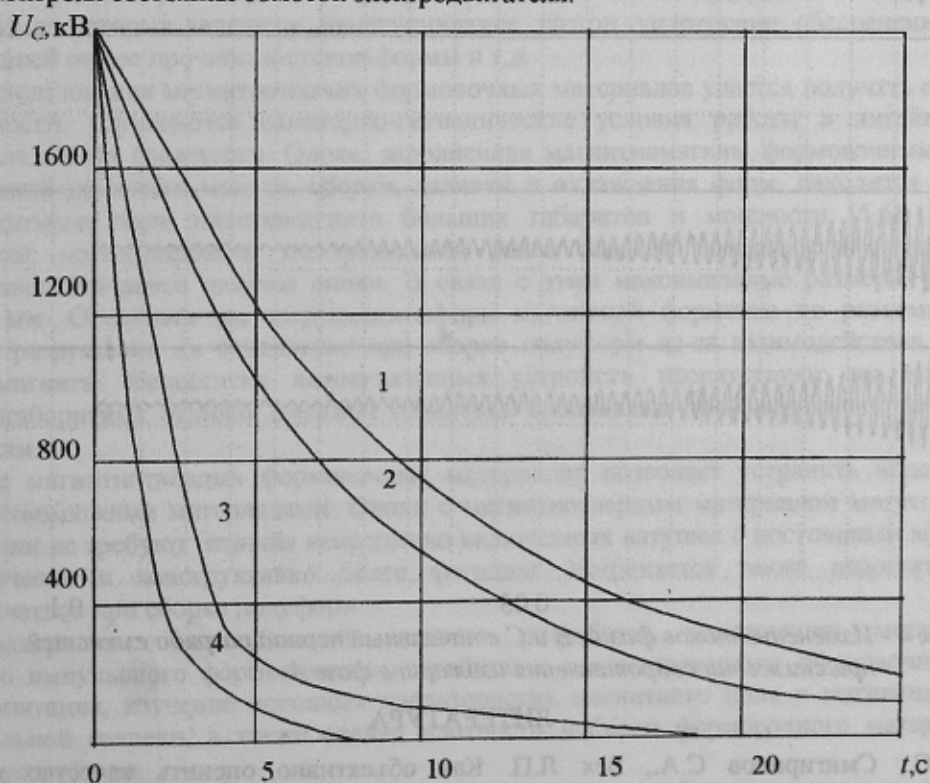


Рисунок 3 - Изменение напряжения на емкости фазы в процессе ее разряда

1.  $R_{IA}=R_{IB}=R_{IC}=10$  МОм;      2.  $R_{IA}=5$  МОм,  $R_{IB}=R_{IC}=10$  МОм;
3.  $R_{IA}=1$  МОм,  $R_{IB}=R_{IC}=10$  МОм;
4.  $C_A=1$  мкФ,  $C_B=C_C=0,3$  мкФ,  $R_{IA}=R_{IB}=R_{IC}=10$  МОм,

Характер переходного процесса саморазряда емкости можно определить по виду корней характеристического уравнения, найденных без учета сопротивления изоляции:  $p_{1,2} = -\frac{R}{2L'} \pm \sqrt{\frac{R^2}{4(L')^2} - \frac{1}{LC}}$ .

Для вышеприведенных данных при  $R < 490$  Ом корни комплексные и сопряженные, а поэтому процесс разряда емкостей происходит в виде затухающих колебаний. Такая величина  $R$  может быть только у маломощных электродвигателей. Поэтому появление переменной составляющей при саморазряде емкостей фаз кабеля может использоваться в качестве диагностического параметра.

Практически, в условиях эксплуатации, выполнять оценку изоляции можно по появлению высокочастотной составляющей или междуфазного напряжения в процессе разряда емкостей. При одинаковых постоянных времени по фазам процесс разряда будет идти одинаково по всем фазам, а поэтому междуфазные напряжения будут отсутствовать. При возникновении дефекта изоляции, который вызывает изменение или ёмкости или её сопротивления, появится междуфазное напряжение. Его величина, а также постоянные времени разряда по фазам позволяют определить не только поврежденную фазу, но и место возникновения дефекта. Последнее является задачей дальнейших исследований.

#### Выводы

1. Предложенный метод оценки состояния изоляции, основанный на определении постоянных времени заряда емкостей фаз присоединения и постоянных времени саморазряда этих емкостей, позволяет более полно диагностировать изоляцию всего электрического присоединения, сократить количество измерений при его реализации и не отключать кабель от питаемого элемента.

2. Место дефекта изоляции может определяться на основании полученных значений постоянных времени заряда и разряда емкостей изоляции присоединения, а также частоты периодической слагающей тока саморазряда емкостей фаз.

3. При необходимости метод оценки состояния изоляции может применяться отдельно к каждой фазе присоединения при размыкании соединений нулевых выводов обмоток двигателя.

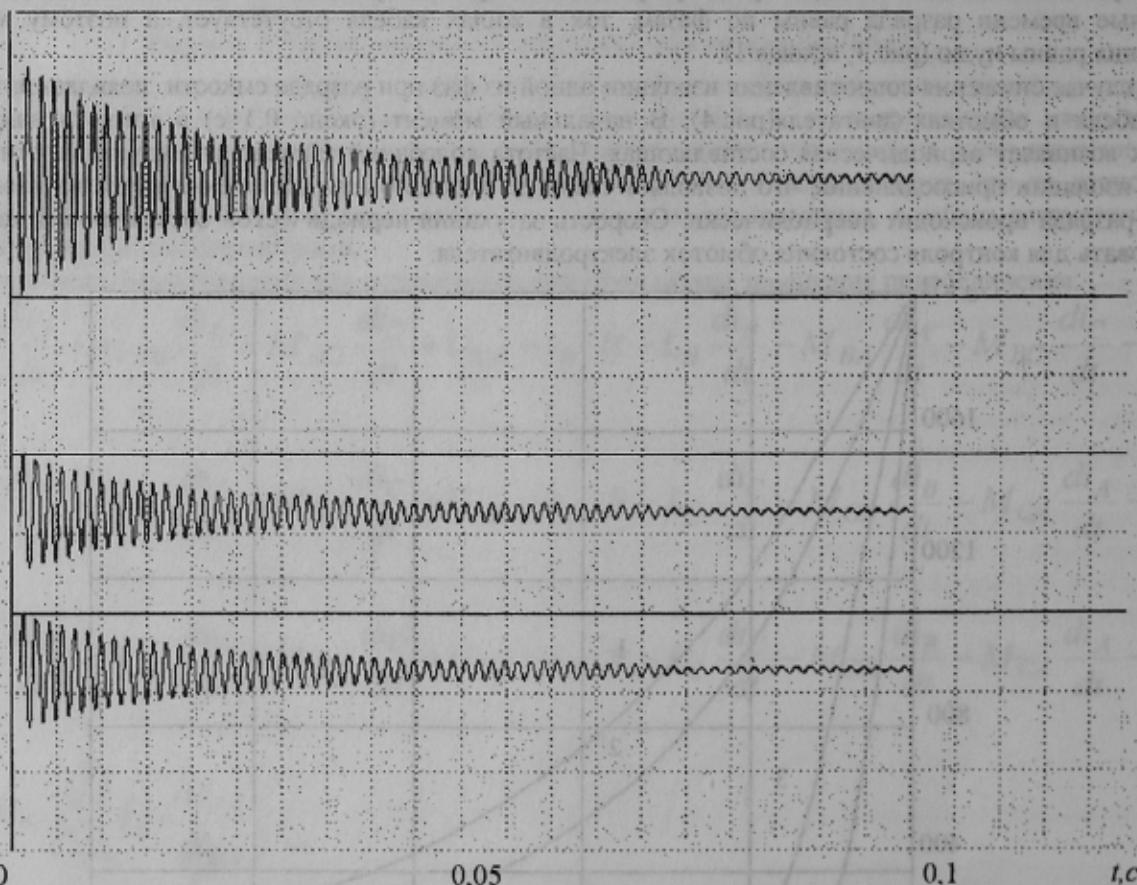


Рисунок 4 - Изменение токов фаз А, В и С в начальный период разряда емкостей при снижении сопротивления изоляции в фазе А

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Серебряков А.С., Смигиринов С.А., Бех Л.П. Как объективно оценить качество изоляции тяговых электродвигателей. - Изв. вузов СССР. Электромеханика, 1986, №7, с.40-44.
2. Белоусова Н.В. Оценка технического состояния обмоток электрических машин по переходному процессу. - Изв. вузов СССР. Электромеханика, 1986, № 7, с.44-48.
3. Лебедев Г.М., Бахтин Н.А., Брагинский В.И. Математическое моделирование локальных дефектов изоляции силовых кабелей 6-10 кВ. Электричество, 1998, №12, с.23-27.