

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ВЫЯВЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ ВРЕМЕННО ОТКЛЮЧЕННЫХ ПРИСОЕДИНЕНИЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ 6-10 КВ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Гребченко Н.В.

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк
кафедра электрических станций

Abstract

Grebchenko N.V. Automatization of defects showing up process of dormant 6-10kV electric motor connection for industrial users objects. The method of detect flaws is viewed. Base of the method is analysis of capacity connection discharge transient when test dc voltage is disconnecting. Means circuit of automatic control for method achievement is produced.

Общая постановка проблемы. В связи со сменностью режима работы промышленных предприятий или в соответствии с особенностями технологических процессов некоторые электрические потребители отключаются на время от нескольких часов до нескольких суток. Возникающие за это время дефекты изоляции присоединений электродвигателей (ЭД) обнаруживаются только после включения их под рабочее напряжение. Последующее аварийное отключение электродвигателей нарушает последовательность технологических процессов и сопровождается перерасходом электроэнергии и ингредиентов, а также разрушениями ЭД. Поэтому необходима автоматическая оценка допустимости включения присоединений электродвигателей.

Постановка задач исследования. Во многих случаях для персонала важно не только знать о возможности дальнейшей эксплуатации электрооборудования, но и оценить оставшийся ресурс изоляции. Обычно эти вопросы решаются совместно в результате испытаний или других действий по измерению характеристик. Например, при профилактических испытаниях в качестве прогнозирующего параметра предложено использовать $tg\delta$ [1]. Но следует учесть то, что сами профилактические испытания представляют опасность для изоляции и поэтому от их применения во многих странах уже отказались. Несмотря на высокую техническую эффективность диагностики, основанной на получении временного графика тока утечки, определении кривой восстановления напряжения после размыкания шунтирующего выключателя и других параметров [2], этот метод также не может быть использован из-за необходимости приложения напряжения величиной до двойного номинального. Достаточно совершенный метод испытаний изоляции кабеля, в основу которого положено измерение тока утечки [3], требует не только отключения кабеля, но и его отключения от двигателя. Установка для диагностики кабеля KDA-1 немецкой фирмы Seba dynatronics предназначена для оценки текущего состояния кабелей [4]. В установке используется метод изотермического анализа тока релаксации, который дает возможность получать надежное и калиброванное представление о степени старения кабеля. Появление релаксационных токов происходит при разряде кабеля с полиэтиленовой изоляцией после его формирования постоянным напряжением. Однако метод предназначен только для кабелей с полиэтиленовой изоляцией и, несмотря на высокое совершенство, не может применяться для обмоток электрических машин.

Таким образом, известные методы оценки состояния отключенных присоединений в основном ориентированы на оценку остаточного ресурса изоляции и как правило не применяются в автоматическом режиме. Кроме того, несмотря на то, что эксплуатационному персоналу важно иметь информацию об остаточном ресурсе изоляции, для него еще более важно знать о допустимости включения оборудования в данный конкретный момент времени. Такая информация может быть получена только непосредственно перед

включением, а сама процедура получения этой информации должна быть полностью автоматизирована и не требовать от персонала специальных действий.

Решение задач и результаты исследований. Метод оценки состояния электрической изоляции отключенных присоединений [5] основан на том, что на отключенное присоединение нагрузки (двигатель, трансформатор и т.д.) кратковременно подается тестовый сигнал в виде прямоугольного импульса постоянного напряжения. По результатам измерения величины междуфазного напряжения, а также постоянной времени цепи заряда и постоянной времени цепи разряда емкостей фаз изоляции присоединения по отношению к земле выносятся заключение о наличии дефектов. 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.

Новым параметром по сравнению с известными методами является переменное напряжение между фазами присоединения, которое возникает в процессе саморазряда емкостей присоединения после снятия тестового напряжения. Это переменное напряжение возникает при наличии дефектов изоляции присоединения, а его частота зависит от соотношения величины емкости фаз и величины индуктивности нагрузки.

Если параметры изоляции по всем трем фазам одинаковы, то разряд происходит с одной и той же постоянной времени, а поэтому междуфазные напряжения не возникают. Если же параметры изоляции фаз присоединения отличаются, то возникает колебательный процесс перезаряда емкостей, который в разных фазах идет с различными постоянными времени и поэтому появляются междуфазные напряжения.

Диагностика изоляции присоединения по предлагаемому методу выполняется следующим образом. Схема проведения измерений для оценки состояния изоляции присоединения кабель-двигатель приведена на рис.1. При отключенном высоковольтном выключателе Q присоединения в его ячейке на одну из фаз от постороннего источника G подается тестовое постоянное напряжение порядка 2000-2500 В. С помощью цифрового регистратора с большим входным сопротивлением (не менее 20 МОм) фиксируется процесс достижения напряжением на двух других фазах установившегося значения. Затем фиксируются междуфазные, а также напряжения фаз по отношению к земле в процессе саморазряда емкостей изоляции через сопротивления изоляции. Процесс саморазряда начинается после отключения источника тестового напряжения. На основании полученных данных определяется фаза с дефектом изоляции и постоянные времени заряда и разряда для каждой фазы.

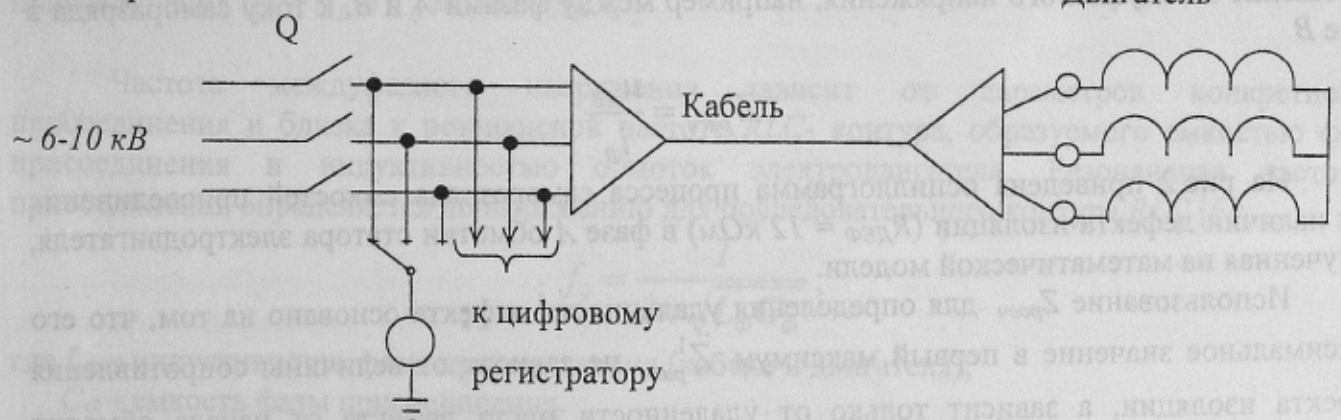


Рисунок 1 - Схема проведения измерений при диагностике присоединения кабель-двигатель

При этом учитываются внутренние сопротивления источника тестового напряжения и цифрового регистратора. Значительное отличие величины постоянных времени по фазам или величин, определяемых ними, 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.

При определении места дефекта изоляции глубина поиска выбирается в зависимости от поставленной задачи и в общем случае проводится на трех уровнях: верхний уровень – выявляется только элемент присоединения с дефектной изоляцией, т.е. кабель или двигатель; средний уровень – в какой из фаз обмотки статора возник дефект изоляции; нижний уровень – на каком расстоянии b от начала обмотки фазы статора ЭД возник дефект.

Анализ амплитуды междуфазных напряжений и факт наличия только двух междуфазных напряжений при саморазряде емкостей позволяют выявлять элемент присоединения и фазу присоединения с дефектной изоляцией. Но использование только амплитуды междуфазного напряжения не достаточно для однозначного определения элемента с дефектной изоляцией. Это связано с тем, что в случае дефекта в конце кабеля или в начале обмотки ЭД возникают междуфазные напряжения близкие по величине. В качестве дополнительного фактора можно использовать величину тока разряда в каждой фазе, но их измерение вызывает большие трудности. Очевидно, что угол между током разряда и междуфазным напряжением однозначно зависит от того, в какой из фаз присоединения возник дефект изоляции. В таблице 1 приведены междуфазные напряжения, которые возникают при наличии дефекта изоляции в соответствующей фазе присоединения.

Таблица 1

Междуфазные напряжения при саморазряде емкостей присоединения

Междуфазное напряжение	Фаза присоединения с дефектом изоляции		
	A	B	C
U_{AB}	+	+	-
U_{BC}	-	+	+
U_{CA}	+	-	+

Таким образом, междуфазное напряжение не возникает между фазами, в которых нет дефекта изоляции.

Удаленность места дефекта изоляции от начала обмотки статора электродвигателя определяется в зависимости от величины расчетного сопротивления $Z_{расч}$, определяемого как отношение междуфазного напряжения, например между фазами A и B , к току саморазряда в фазе B

$$Z_{расч} = \frac{U_{AB}}{i_B}$$

На рис.2 приведена осциллограмма процесса саморазряда емкостей присоединения при наличии дефекта изоляции ($R_{ДЕФ} = 12 \text{ кОм}$) в фазе A обмотки статора электродвигателя, полученная на математической модели.

Использование $Z_{расч}$ для определения удаленности дефекта основано на том, что его максимальное значение в первый максимум $Z_{расч}^1$ не зависит от величины сопротивления дефекта изоляции, а зависит только от удаленности места дефекта от начала обмотки статора. При определении зависимостей $Z_{расч}^1 = f(R_{ДЕФ})$ принят возможный диапазон изменения $R_{ДЕФ}$ от нуля до 100 кОм.

Величина расчетного сопротивления $Z_{расч}^1$ для каждого присоединения различна, но однозначно определяется соотношением емкости кабеля и индуктивности обмотки статора электродвигателя. На рис.3 приведены зависимости расчетного сопротивления $Z_{расч}^1$ от

удаленности дефекта b для присоединений двигателя 500 кВт с различной длиной кабеля. По мере увеличения длины кабеля зависимость $Z_{расч}^1 = f(b)$ становится более пологой.

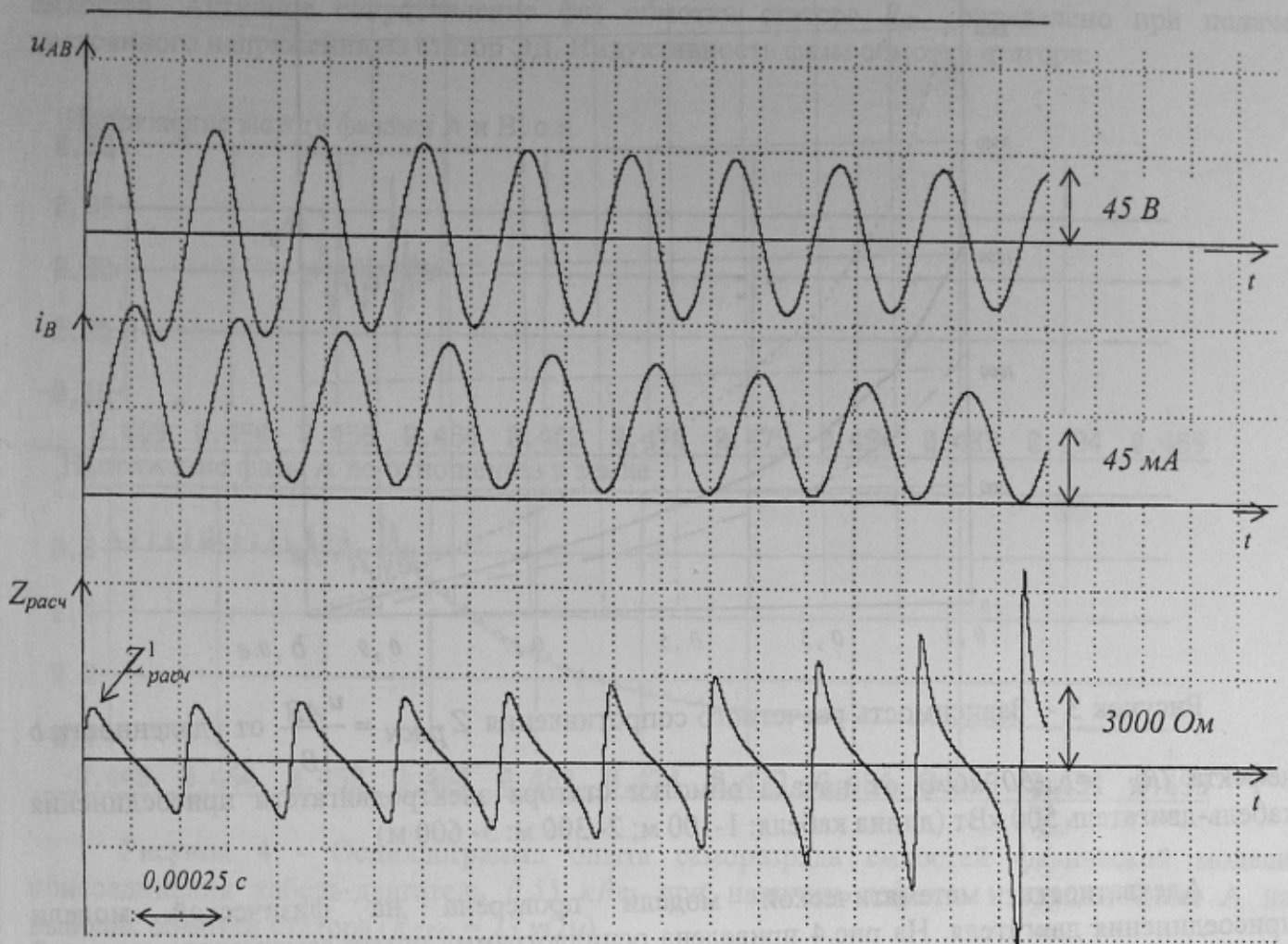


Рисунок 2 - Осциллограмма процесса саморазряда емкостей присоединения и определения $Z_{расч}$ при наличии дефекта изоляции ($R_{ДЕФ} = 12 \text{ кОм}$) в фазе A обмотки статора электродвигателя 500 кВт на расстоянии $b=0,2$ от начала обмотки (емкости фаз присоединения $C_A = C_B = C_C = 0,0000001 \text{ Ф}$)

Частота междуфазного напряжения зависит от параметров конкретного присоединения и близка к резонансной частоте RLC - контура, образуемого емкостью фаз присоединения и индуктивностью обмоток электродвигателя. Резонансная частота присоединения определяется по выражению для последовательного контура RLC [6]:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_\phi C_\phi}}$$

где L_ϕ – индуктивность фазы присоединения (кабеля и двигателя);

C_ϕ – емкость фазы присоединения.

Для присоединений с ЭД, мощность которых находится в диапазоне 500-5000 кВт, частота междуфазного напряжения составляет от 1700 до 12200 Гц. Увеличению мощности ЭД соответствует снижение индуктивности их обмоток, а поэтому при неизменной емкости резонансная частота повышается. Чем больше длина кабеля присоединения, тем больше емкость его фаз и соответственно меньше значение резонансной частоты присоединения.

$Z_{расч}, Ом$

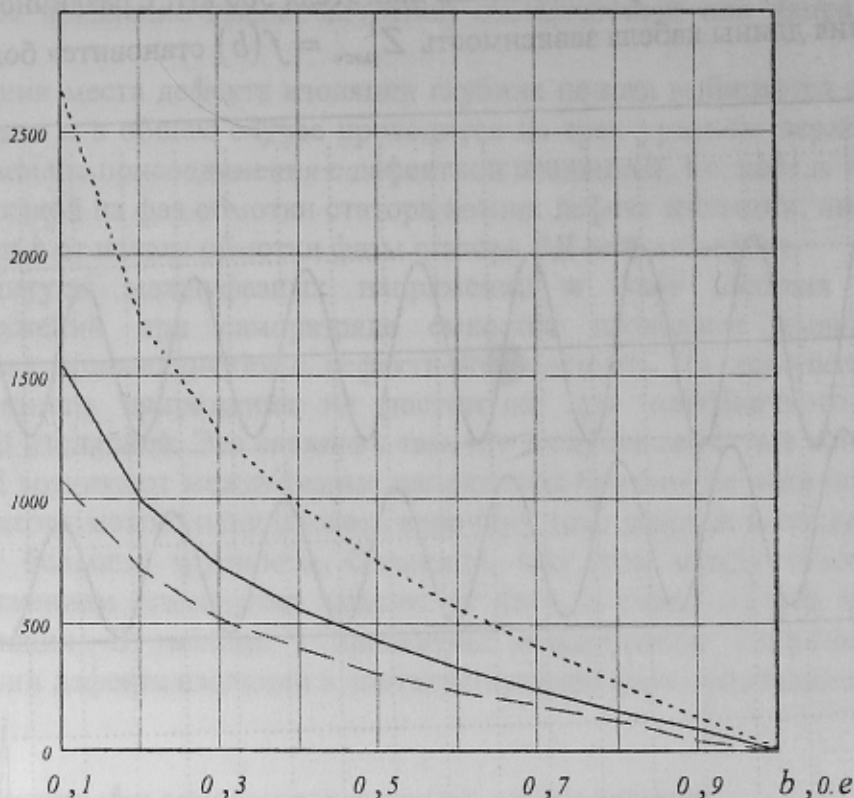


Рисунок 3 - Зависимость расчетного сопротивления $Z_{расч} = \frac{u_{AB}}{i_B}$ от удаленности b

дефекта ($R_d = 1...50 кОм$) от начала обмотки статора электродвигателя присоединения кабель-двигатель 500 кВт (длина кабеля: 1-100 м; 2- 300 м; 3- 600 м)

Адекватность математической модели проверена на физической модели присоединения двигателя. На рис.4 приведена осциллограмма опыта саморазряда емкостей физической модели присоединения 0,4 кВ двигателя мощностью 0,55 кВт. Кабель в физической модели представлен сосредоточенными емкостями величиной по 0,1 мкФ, что соответствует кабелю сечением 95,0 мм² и длиной 0,1 км. На рис.6 приведена осциллограмма расчета режима саморазряда емкостей присоединения того же присоединения 0,4 кВ двигателя мощностью 0,55 кВт на математической модели. Результаты сравнения физической и математической моделей присоединения двигателя по основным критериям приведены в табл.2.

Таблица 2

Сравнение физической и математической моделей присоединения двигателя мощностью 0,55 кВт

Модель	Критерии сравнения		
	Частота тока и напряжения, Гц	Максимальная величина междуфазного напряжения $U_{AB}, В$	Время разряда до величины $0,9U_{заряда}, с$
Физическая	1628,0	9,19	0,0175
Математическая	1481,0	9,90	0,0180
Отличие параметра математической модели от физической, %	9,03	7,7	2,86

Индуктивность обмоток ЭД для математической модели определена из опыта подачи на статор однофазного переменного напряжения частотой 50 Гц, при этом обеспечивалось соответствие направления токов в фазах обмотки статора их направлениям при саморазряде емкостей. Активное сопротивление фаз обмотки статора R_{Φ} определено при подаче постоянного напряжения на статор ЭД. Индуктивность фазы обмотки статора:

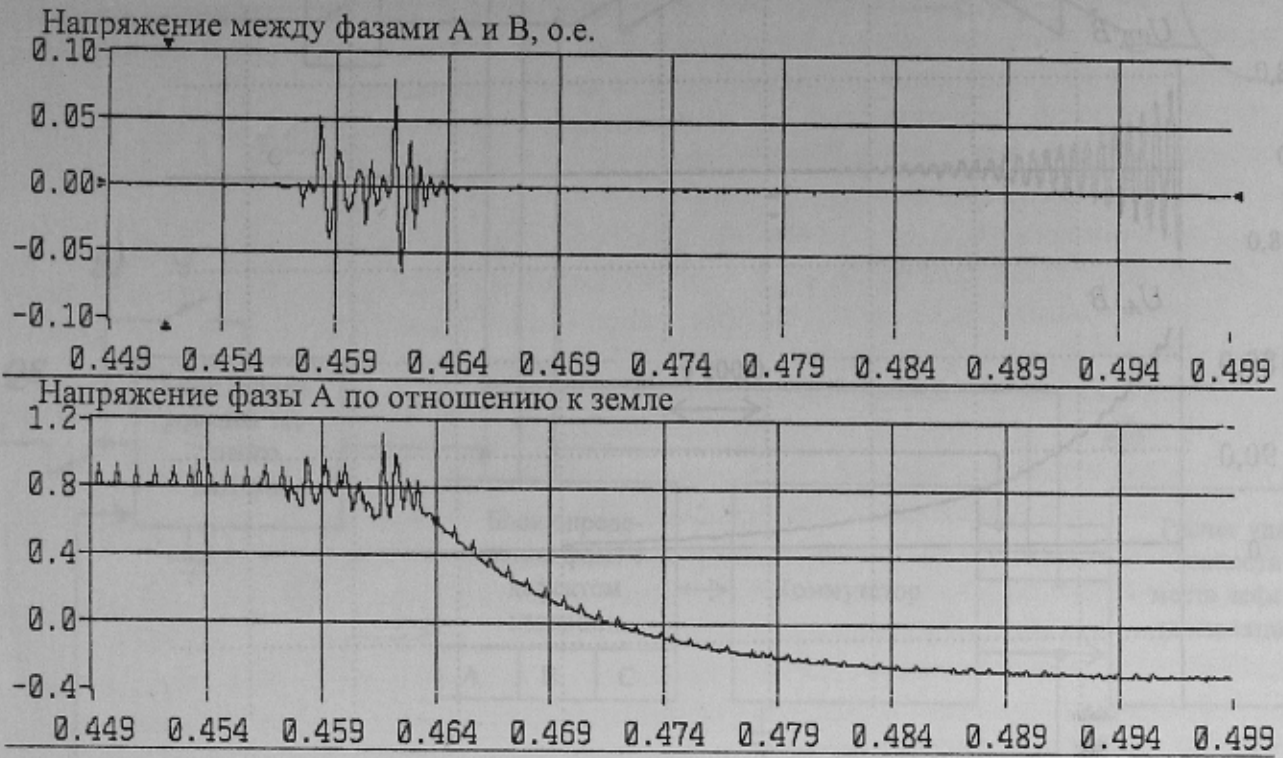


Рисунок 4 - Осциллограмма опыта саморазряда емкостей физической модели присоединения кабель-двигатель 0,55 кВт при наличии дефекта изоляции фазы А на выводах обмотки статора ($R_{ДЕ\Phi} = 23 \text{ кОм}$)

$$L_{\Phi} = \frac{X_{\Phi}}{\omega} = \frac{\sqrt{Z_{\Phi}^2 - R_{\Phi}^2}}{2\pi f} = \frac{\sqrt{39,84^2 - 17,1^2}}{2\pi \cdot 50} = 0,1145 \text{ Гн.}$$

Резонансная частота физической модели присоединения

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{0,1145 \cdot 0,1 \cdot 10^{-6}}} = 1487,4 \text{ Гц.}$$

Таким образом, анализ осциллограмм на рис.4 и рис.5, а также данных табл.2, позволяет сделать вывод об адекватности математической модели присоединения двигателя в режиме саморазряда емкостей присоединения.

Автоматизация рассмотренного выше метода выявления дефектов отключенных присоединений основана на использовании операции подачи оперативного тока на схему защиты и управления высоковольтным выключателем присоединения, которая всегда выполняется перед включением выключателя присоединения. Эта операция инициирует автоматический процесс диагностирования включаемого присоединения, который заключается в подаче на одну из фаз присоединения тестового сигнала в виде прямоугольного импульса постоянного напряжения и последующей оценке параметров возникающего процесса заряда и саморазряда емкостей фаз присоединения. Длительность

импульса напряжения должна заведомо превышать длительность переходного процесса заряда емкостей. Принципиальная схема автоматики диагностирования отключенного присоединения приведена на рис.6.

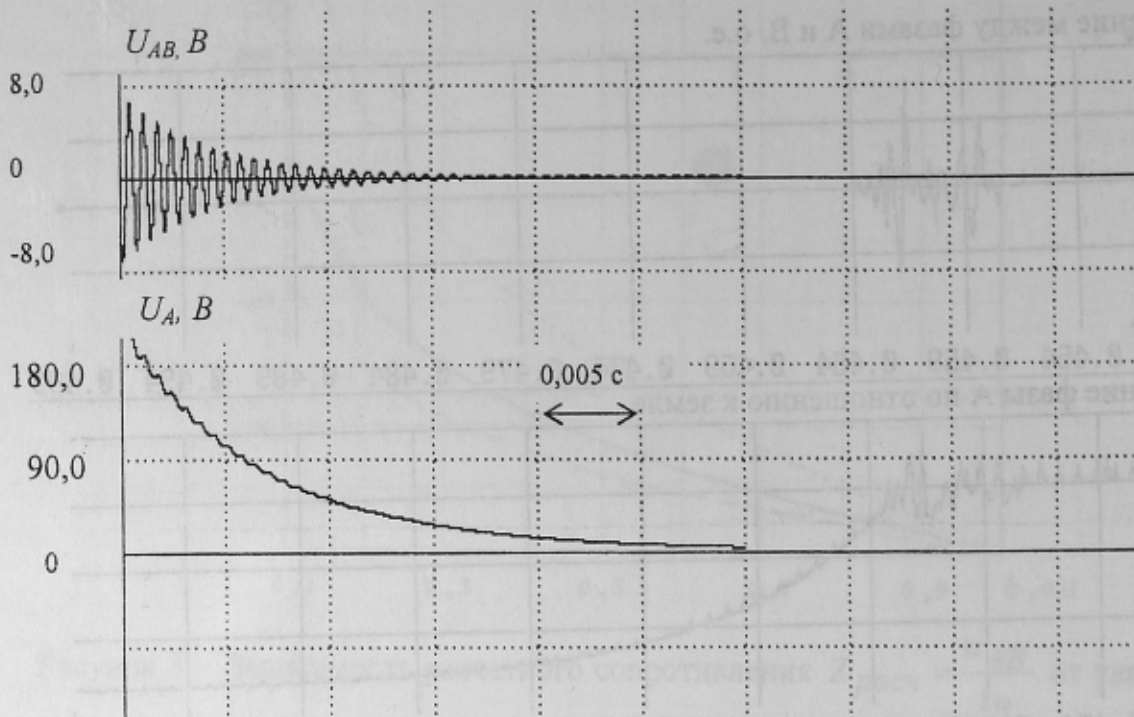


Рисунок 5 - Осциллограмма расчета саморазряда емкостей присоединения кабель-двигатель $0,55 \text{ кВт}$ при наличии дефекта изоляции фазы А на выводах обмотки статора ($R_{ДЕФ} = 23 \text{ кОм}$)

В процессе подготовки к включению выключателя КРУ 6-10 кВ эксплуатационным персоналом выполняется подача оперативного тока на схему управления выключателем. Для этого в ячейке КРУ включается автоматический выключатель SF , подающий постоянный (переменный) оперативный ток 220 В. Эта операция включения является последней перед включением высоковольтного выключателя 6(10) кВ Q и поэтому используется в качестве пускового фактора для формирования тестового сигнала.

В исходном состоянии при отключенном выключателе Q его вспомогательные контакты QS находятся в замкнутом состоянии, но при отключенном оперативном токе на блок формирования тестового сигнала питание не подается. При отключенном автоматическом выключателе оперативного тока SF его вспомогательный контакт SF разомкнут.

В результате включения SF происходит замыкание его вспомогательного контакта SF , что приводит к подаче блоком формирования тестового сигнала на одну из фаз присоединения. Если в результате возникает переменное междуфазное напряжение, величина которого выше заданного значения $U_{зад}$, то блоком определяется выявляется фаза присоединения, в которой имеется дефект изоляции. Если выявляется наличие дефекта изоляции, то коммутатор выполняет подключение сопротивления заданной величины между фазами присоединения и землей, а затем блоком формирования повторно подается тестовый сигнал на присоединение.

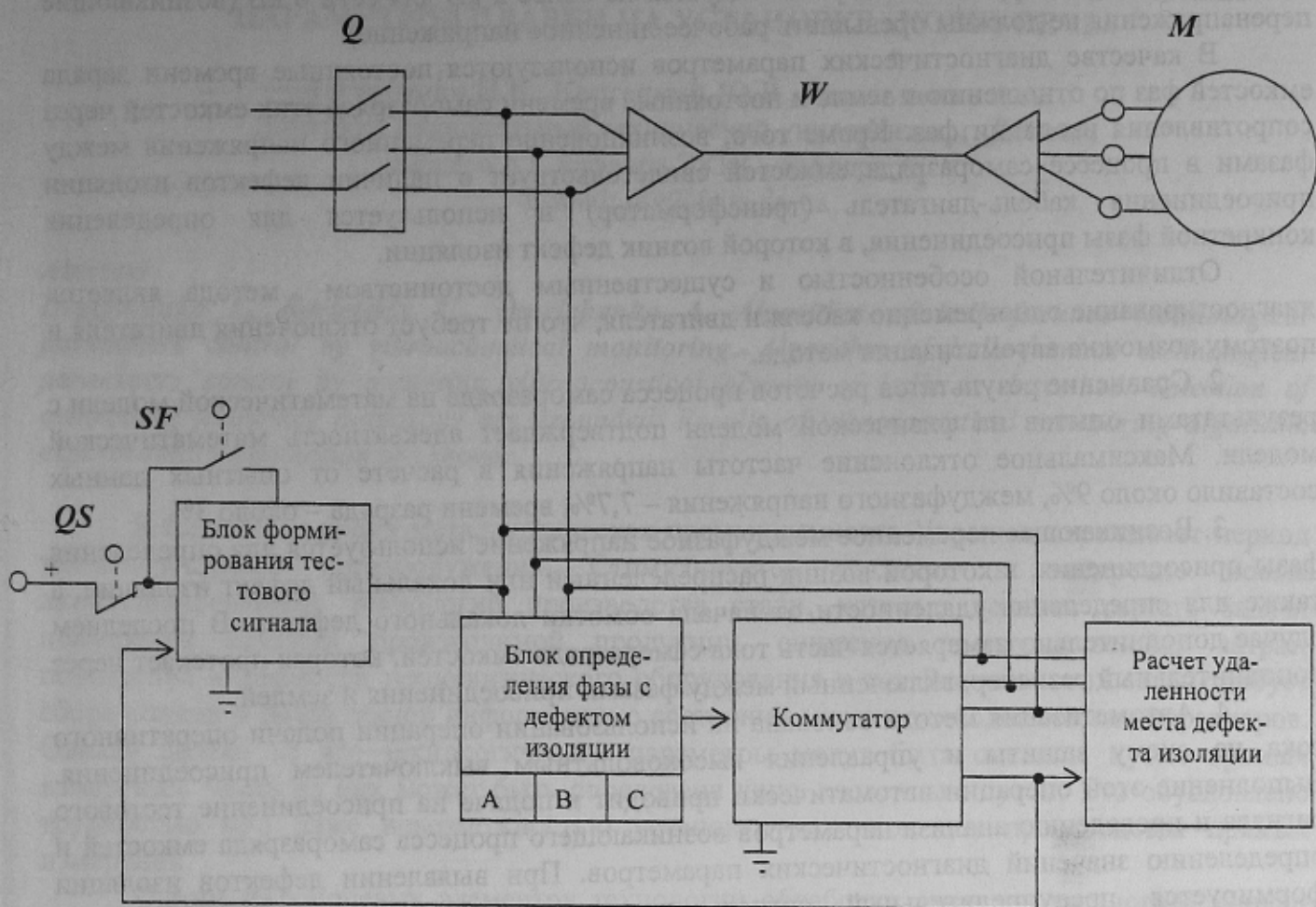


Рисунок 6 - Принципиальная схема автоматики диагностирования отключенного присоединения

В возникающем переходном процессе определяется максимальное значение расчетного сопротивления $Z_{расч}^1$, на основании которого определяется удаленность b дефекта изоляции. При выявлении незначительного дефекта изоляции формируется предупредительный сигнал, а в случае недопустимости включения присоединения блокируется включение высоковольтного выключателя присоединения.

Величина заданного напряжения $U_{Зад}$ определяется расчетом на математической модели как междуфазное напряжение, которое возникает при саморазряде емкостей из-за несимметрии активной проводимости изоляции фаз. В математической модели учитываются реальные параметры оборудования. В общем случае междуфазное напряжение, возникающее из-за несимметрии проводимостей изоляции фаз, зависит от соотношения емкости и индуктивности фаз присоединения. Например, междуфазное напряжение U_{AB} составляет от 0,2 до 2,6 В при изменении величины активной проводимости фазы А присоединения двигателя мощностью 0,55 кВт от 900 до 100 кОм.

Выводы

1. Метод оценки состояния изоляции перед подачей рабочего напряжения на присоединение основан на оценке реакции присоединения двигателя (нагрузки) и изменений диагностических параметров при подаче на присоединение тестового сигнала. В качестве тестового сигнала используется прямоугольный импульс постоянного напряжения.

Амплитуда імпульса постійного напруги вибирається исходя з його допустимості для ізоляції електрооборудовання і рекомендується не більше 2 кВ для мережі 6 кВ (виникаючі перенапруги не повинні перевищувати робоче лінійне напруги).

В якості діагностических параметрів використовуються постійні часи заряду ємкостей фаз по відношенню до землі і постійні часи саморазряду цих ємкостей через спротивлення ізоляції фаз. Крім того, виникнення перемінного напруги між фазами в процесі саморазряду ємкостей свідчить про наявності дефектів ізоляції присоединення кабель-двигатель (трансформатор) і використовується для визначення конкретної фази присоединення, в якій виник дефект ізоляції.

Отличительной особенностью і суттєвим достоїнством методу є діагностування одночасно кабелю і двигателя, що не потребує відключення двигателя і тому можлива автоматизація методу.

2. Сравнение результатов расчетов процесса саморазряда на математической модели с результатами опытов на физической модели подтверждает адекватность математической модели. Максимальное отклонение частоты напруги в расчете от опытных данных составило около 9%, междуфазного напруги – 7,7%, времени разряда – около 3%.

3. Возникающее переменное междуфазное напруги используется для определения фазы присоединення, в якій виник розподілений або локальний дефект ізоляції, а також для визначення віддаленості від початку обмотки локального дефекта. В останньому випадку додатково вимірюється частина струму саморазряду ємкостей, яка протікає через додатковий резистор, включений між фазами присоединення і землею.

4. Автоматизація методу оснований на використанні операції подачі оперативного струму на схему захисту і управління високовольтним вимикачем присоединення. Виконання цієї операції автоматично приводить до подачі на присоединення тестового сигналу і проведенню аналізу параметрів виникаючого процесу саморазряду ємкостей і визначенню значень діагностических параметрів. При виявленні дефектів ізоляції формується попереджувальний сигнал, а в випадку недопустимості включення присоединення блокується включення високовольтного вимикача.

Литература

1. Локшин М.В. К анализу профилактических испытаний бумажно-масляной изоляции аппаратов высокого напруги // *Электричество* .- 1978. - №6. – С. 75-78.
2. Глинка Т. Диагностика изоляции обмоток электрических машин постоянным напруги // *Электричество* .- 1998 .- № 1 .- С. 60-63.
3. Muhr M., Strobl R., Woschitz R. Entladestrommethode – Ein Prüfverfahren für kunststoffisolierte Mittelspannungskabel // *Elektrotechn. und Informationstechn.* – 1998 .- 115, № 6 .- С. 321 – 326.
4. KDA-1. Установка для диагностики кабелю // *Техническая информация фирмы Seba dynatronic. Telekommunikationstechnik GmbH, D-96148 Baunach.* 1996. – 2 с.
5. Гребченко Н.В. Оценка состояния электрической изоляции по параметрам электрических переходных процессов в ней // *Труды Донецкого государственного технического университета* . Сборник научных трудов ДонГТУ. Серия: электротехника и энергетика. Выпуск 4.-Донецк: ДонГТУ.- 1999.- с.245-248.
6. Основы теории цепей: Учебник для вузов // Г.В.Зевеке, П.А.Ионкин, А.В.Нетушил и др. - М.: Энергоатомиздат.- 1989.-528 с.