

## **МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИЗОЛЯЦИИ ПРИСОЕДИНЕНИЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ, ИМЕЮЩИХ СТАТИЧЕСКУЮ И ДИНАМИЧЕСКУЮ НЕСИММЕТРИЮ**

*Гребченко Н.В., Сидоренко А.А., Бельчев И.В.*

*Донецкий национальный технический университет*

[gvn@dgtu.donetsk.ua](mailto:gvn@dgtu.donetsk.ua)

*The method is submitted which allows to define parameters of isolation defects electric motor joinings in working condition. The mathematical model of a cable-electric motor joining is offered.*

**Введение.** Методы непрерывной оценки состояния изоляции, позволяющие определять на ранней стадии параметры дефектов изоляции, становятся все более востребованными. Они способствуют повышению качества эксплуатации электрооборудования. Наибольший практический интерес эти методы представляют для присоединений электродвигателей (ЭД), что обусловлено повышенной повреждаемостью ЭД.

**Постановка задачи исследований.** Параметрический метод [1] определения проводимости изоляции по результатам измерения параметров режима разработан с учетом допущения о симметричности продольных проводимостей контролируемого присоединения нагрузки. При появлении несимметрии метод дает погрешность. Погрешность возникает вследствие того, что в параметрах режима кроме составляющих, обусловленных дефектами изоляции, появляются составляющие, обусловленные несимметрией присоединения. Поэтому для повышения точности метода определения параметров изоляции при наличии (появлении) несимметрии необходимо определить аварийные составляющие, вызванные несимметрией, и исключить их из параметров режима, используемых в качестве входных в параметрическом методе. Другой возможный путь повышения точности заключается во введении в схему замещения присоединения (математическая модель присоединения, в соответствии с которой составляются уравнения текущего состояния) параметров, которые отражают степень и вид несимметрии. Реальные значения вводимых параметров должны определяться для того момента времени, в который решается система уравнений текущего состояния. Следует отметить, что непосредственное определение продольных проводимостей фаз присоединения в рабочем режиме невозможно, т.к. в измеряемые токи фаз присоединения входят токи, обусловленные поперечными проводимостями фаз присоединения, значения которых неизвестны.

**Результаты исследований.** Для установления зависимости параметров рабочих режимов контролируемых присоединений кабель-двигатель от параметров дефектов изоляции наиболее целесообразно проведение математического моделирования в виде серий вычислительных экспериментов. Обоснованность применения соответствующей математической модели должна быть подтверждена сопоставлением с экспериментальными данными. Отличительной особенностью математической модели присоединения кабель-двигатель является учет в ней различных типов несимметрии ЭД.

Поскольку ЭД, питающиеся от одной (двух) секций 6-10 кВ оказывают взаимное влияние, как правило, используются в одном технологическом процессе и территориально расположены вблизи друг от друга, то при организации диагностирования ЭД целесообразно рассматривать некий узел (участок) электрической сети в пределах подстанции, предприятия, цеха или системы с.н. энергоблока ТЭС.

На рис. 1 приведен один из вариантов структурной схемы узла электрической сети, в состав которого входят присоединения 3, 6-10 кВ кабель-ЭД. Схема состоит из следующих основных элементов: источник питания (обмотка силового трансформатора, не имеющая электрической связи с источником питания); сборные шины (секция сборных шин) 3, 6-10 кВ, от которых питаются присоединения кабель-ЭД; все присоединения кабель-ЭД и кабель-нагрузка, объединенные в эквивалентную часть, за исключением исследуемого присоединения кабель-ЭД.

На рис. 1 указаны измерительные трансформаторы тока фаз ТА и трансформатор тока нулевой последовательности ТАН, а также измерительный трансформатор напряжения ТВ, подключенный к питающей секции. Эти трансформаторы являются датчиками параметров режима контролируемого присоединения кабель-ЭД.

Эквивалентная часть узла сети электрически связанных элементов обеспечивает учет суммарной нагрузки секции, что проявляется в снижении напряжения на секции на величину падения напряжения в источнике питания от суммарного тока нагрузки. Суммарная проводимость изоляции фаз эквивалентной части определяет вектор тока нулевой последовательности контролируемого присоединения при возникновении на нем дефектов изоляции.

При математическом моделировании рабочих режимов присоединений кабель-ЭД необходимо выполнять учет изменения конфигурации сети (включение или отключение нагрузки; включение или отключение линий, которые питают распределительные пункты и т.д.). Это осуществляется путем соответствующего изменения параметров эквивалентной части узла сети.

Исходя из поставленной задачи выявления дефектов изоляции в рабочих режимах, основные требования к математической модели присоединения кабель-электродвигатель могут быть сформулированы следующим образом:

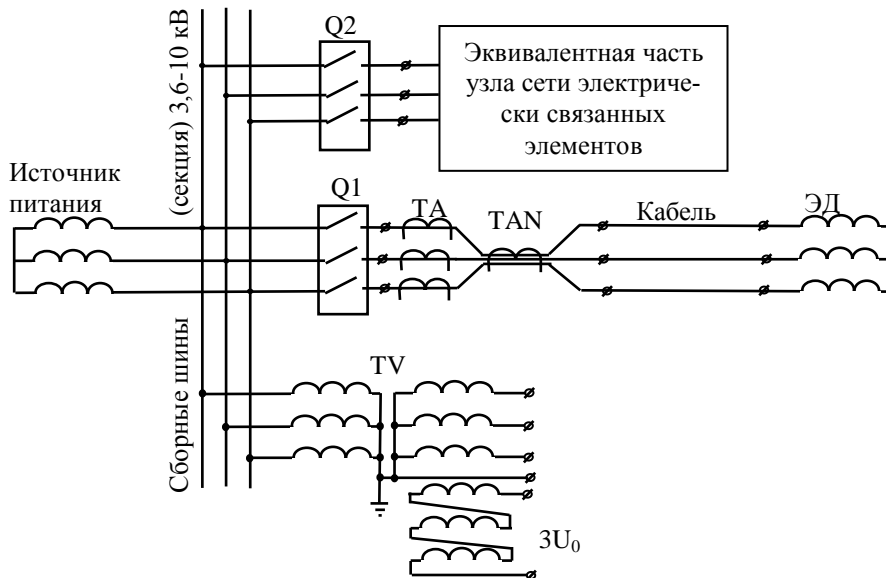


Рисунок 1- Структурная схема узла электрической сети, в состав которого входят присоединения кабель-ЭД

- модель должна позволять определять те параметры текущего режима, которые зависят от дефектов изоляции и в реальных условиях являются доступными для непрерывного измерения (токи фаз и напряжения фаз по отношению к земле) или может быть целесообразным измерение в соответствии с методом диагностирования (при отсутствии ТА в одной из фаз);

- модель должна наиболее полно учитывать параметры основных элементов, т.е. кабеля и двигателя (номинальная мощность ЭД, тип кабеля и т.д.) и учитывать отличия параметров в фазах и возможное их изменение во времени, а также характерные особенности элементов, оказывающих влияние на параметры рабочих режимов (степень загрузки ЭД);

- модель должна отражать все рабочие режимы ЭД и все возможные дефекты изоляции элементов, которые предполагается выявлять в рабочих режимах, в том числе и локальные дефекты на разной удаленности от начала присоединения.

В элементах присоединений кабель-двигатель основным источником продольной несимметрии является обмотка статора ЭД. Продольные проводимости фаз кабеля благодаря геометрической симметрии взаимного расположения фаз и практически одинаковой длине равны между собой.

На основании разработанных требований присоединение кабель-ЭД 6-10 кВ (линия-нагрузка) может быть представлено схемой замещения, которая приведена на рис. 2 [1].

В соответствии со схемой замещения присоединения кабель-нагрузка (рис.2) соотношение для векторов фазных токов присоединения  $\dot{I}_A$ ,  $\dot{I}_B$  и  $\dot{I}_C$  (токи измеряются с помощью соответствующего трансформатора тока ТАА, ТАВ, ТАС) при известных напряжениях фаз по отношению к земле  $\dot{U}_A$ ,  $\dot{U}_B$ ,  $\dot{U}_C$  в нормальном режиме работы:

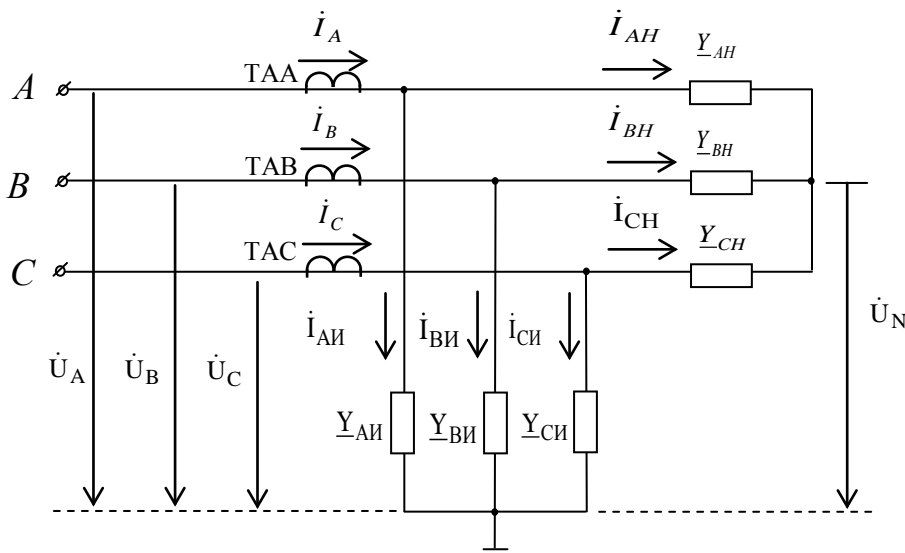


Рисунок 2 - Схема замещения присоединения нагрузки в сети с изолированной нейтралью

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{U}_A \cdot \underline{Y}_{AI} + (\dot{U}_A - \dot{U}_N) \cdot \underline{Y}_{AH} \\ \dot{I}_B &= \dot{U}_B \cdot \underline{Y}_{BI} + (\dot{U}_B - \dot{U}_N) \cdot \underline{Y}_{BH} \\ \dot{I}_C &= \dot{U}_C \cdot \underline{Y}_{CI} + (\dot{U}_C - \dot{U}_N) \cdot \underline{Y}_{CH} \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} (1) \\ (2) \\ (3) \end{array}$$

где  $\underline{Y}_{AH}, \underline{Y}_{BH}, \underline{Y}_{CH}$  и  $\underline{Y}_{AI}, \underline{Y}_{BI}, \underline{Y}_{CI}$  - соответственно продольные и поперечные проводимости присоединения.

Для решения системы (1)-(3) относительно проводимостей изоляции необходимо знать значения продольных проводимостей присоединения или принять равными между собой, что позволяет исключить их из системы. Во втором случае реальное соотношение между собой значений продольных проводимостей фаз нагрузки контролируемого присоединения оказывает большое влияние на точность определения проводимостей изоляции фаз по отношению к земле при решении системы уравнений (1)-(3).

В методе определения комплексных проводимостей изоляции в рабочих режимах электрических присоединений [1] используется непрерывное решение системы уравнений текущего состояния.

Система (1)-(3) может быть преобразована, если принять допущение о равенстве продольных проводимостей фаз нагрузки. Это позволяет вообще исключить продольные проводимости из уравнений.

Однако реальные значения продольных проводимостей фаз нагрузки несколько отличаются друг от друга, из-за чего возникает погрешность в определении комплексной проводимости изоляции фаз по отношению к земле.

В связи с этим возникла необходимость определить область применения этого метода, а также расширить область применения метода за счет его адаптации к реальным соотношениям продольных параметров фаз присоединений нагрузки. Кроме того, известно, что величина продольной проводимости фаз электродвигателя не является постоянной и зависит от нагрузки механизма, а также от состояния самого электродвигателя (наличие неравномерности воздушного зазора; замыкание нескольких витков фазы обмотки статора, не требующее немедленного отключения ЭД; обрыв нескольких стержней короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного электродвигателя и т.д.). Таким образом возникает необходимость разработки непрерывного метода определения комплексной проводимости изоляции при наличии статической и динамической несимметрии ЭД.

Основные причины возникновения отличия продольных проводимостей фаз нагрузки, которое не изменяется во времени, т.е. статической несимметрии:

- отклонение от технологии при изготовлении или конструктивные изменения после ремонта ЭД (технологическая несимметрия);
- короткое замыкание нескольких витков одной фазы обмотки статора ЭД (витковое замыкание);
- дефект междуфазной изоляции (наиболее вероятен на выводах обмотки статора ЭД).

Динамическая несимметрия проявляется в периодическом изменении продольных проводимостей каждой фазы присоединения и возникает, в основном, по следующим причинам:

- нарушение симметрии воздушного зазора в ЭД;
- износ подшипников ЭД;
- обрывы стержней короткозамкнутой обмотки ротора АД.

Несимметрия в виде междуфазных к.з. или обрывов фаз в методе не учитывается, т.к. является кратковременной. В случае возникновения таких повреждений ЭД быстро отключаются.

Рассмотрим частный случай несимметрии. Например возникла несимметрия только в фазе А, тогда комплексные продольные проводимости фаз В и С равны между собой:  $\underline{Y}_{BH} = \underline{Y}_{CH}$ ,

а комплексная продольная проводимость фазы А:  $\underline{Y}_{AH} = \underline{K}_{HA} \cdot \underline{Y}_{CH} = \underline{K}_{HA} \cdot \underline{Y}_{BH}$ .

Тогда для трех фаз можно записать

$$\underline{Y}_{AH} = \underline{K}_{HA} \cdot \underline{Y}_H, \quad (4)$$

$$\underline{Y}_{BH} = \underline{Y}_H, \quad (5)$$

$$\underline{Y}_{CH} = \underline{Y}_H, \quad (6)$$

где  $\underline{K}_{HA}$  – комплексный коэффициент несимметрии фазы А.

Подставим (4), (5) и (6) соответственно в (1), (2) и (3), получим:

$$\dot{I}_A = \dot{U}_A \cdot \underline{Y}_{AI} + (\dot{U}_A - \dot{U}_N) \cdot \underline{K}_{HA} \cdot \underline{Y}_H \quad (7)$$

$$\dot{I}_B = \dot{U}_B \cdot \underline{Y}_{BI} + (\dot{U}_B - \dot{U}_N) \cdot \underline{Y}_H \quad (8)$$

$$\dot{I}_C = \dot{U}_C \cdot \underline{Y}_{CI} + (\dot{U}_C - \dot{U}_N) \cdot \underline{Y}_H \quad (9)$$

Необходимо определить коэффициент  $\underline{K}_{HA}$ , считая, что все параметры режима (токи  $I_i$ , напряжения  $U_i$ ), а также проводимости изоляции фаз ( $\underline{Y}_{iH}$ ) известны. Среднее значение проводимости нагрузки  $\underline{Y}_H$  – неизвестно. Найдём  $\underline{Y}_H$  из (8):

$$\underline{Y}_H = \frac{\dot{I}_B - \dot{U}_B \cdot \underline{Y}_{BI}}{\dot{U}_B - \dot{U}_N} \quad (10)$$

Подставим (10) в (7) и найдём  $\underline{K}_{НА}$ :

$$\dot{I}_A - \dot{U}_A \cdot \underline{Y}_{АИ} = \frac{(\dot{U}_A - \dot{U}_N) \cdot (\dot{I}_B - \dot{U}_B \cdot \underline{Y}_{БИ})}{(\dot{U}_B - \dot{U}_N)} \cdot \underline{K}_{НА},$$

$$\underline{K}_{НА} = \frac{(\dot{I}_A - \dot{U}_A \cdot \underline{Y}_{АИ}) \cdot (\dot{U}_B - \dot{U}_N)}{(\dot{I}_B - \dot{U}_B \cdot \underline{Y}_{БИ}) \cdot (\dot{U}_A - \dot{U}_N)} = \frac{(\dot{U}_B - \dot{U}_N)}{(\dot{I}_B - \dot{U}_B \cdot \underline{Y}_{БИ})} \cdot \frac{(\dot{I}_A - \dot{U}_A \cdot \underline{Y}_{АИ})}{(\dot{U}_A - \dot{U}_N)} = \frac{\underline{Y}_{АН}}{\underline{Y}_{ВН}} \quad (11)$$

Если в (11) не известны комплексные проводимости изоляции фаз  $\underline{Y}_{АИ}$  и  $\underline{Y}_{БИ}$ , то  $\underline{K}_{НА}$  определить невозможно. Т.е. по выражению (11) можно определить коэффициент несимметрии при известных  $\underline{Y}_{АИ}$  и  $\underline{Y}_{БИ}$ .

Запишем систему уравнений состояния для случая когда имеется несимметрия только в фазе А.

Найдём из (8)  $\underline{Y}_Н$ :

$$\underline{Y}_Н = \frac{\dot{I}_B - \dot{U}_B \cdot \underline{Y}_{БИ}}{\dot{U}_B - \dot{U}_N} \quad (12)$$

Подставим (12) в (9):

$$\dot{I}_C = \dot{U}_C \cdot \underline{Y}_{СИ} + (\dot{U}_C - \dot{U}_N) \cdot \frac{\dot{I}_B - \dot{U}_B \cdot \underline{Y}_{БИ}}{\dot{U}_B - \dot{U}_N}$$

или

$$(\dot{I}_C - \dot{U}_C \cdot \underline{Y}_{СИ}) \cdot (\dot{U}_B - \dot{U}_N) = (\dot{I}_B - \dot{U}_B \cdot \underline{Y}_{БИ}) \cdot (\dot{U}_C - \dot{U}_N) \quad (13)$$

Найдём из (9)  $\underline{Y}_Н$ :

$$\underline{Y}_Н = \frac{\dot{I}_C - \dot{U}_C \cdot \underline{Y}_{СИ}}{\dot{U}_C - \dot{U}_N} \quad (14)$$

Подставим (14) в (7), получим:

$$\dot{I}_A = \dot{U}_A \cdot \underline{Y}_{АИ} + (\dot{U}_A - \dot{U}_N) \cdot \underline{K}_{НА} \cdot \frac{\dot{I}_C - \dot{U}_C \cdot \underline{Y}_{СИ}}{\dot{U}_C - \dot{U}_N}$$

или

$$(\dot{I}_A - \dot{U}_A \cdot \underline{Y}_{АИ}) \cdot (\dot{U}_C - \dot{U}_N) = \underline{K}_{НА} \cdot (\dot{I}_C - \dot{U}_C \cdot \underline{Y}_{СИ}) \cdot (\dot{U}_A - \dot{U}_N) \quad (15)$$

Найдём из (7)  $\underline{Y}_Н$ :

$$\underline{Y}_Н = \frac{\dot{I}_A - \dot{U}_A \cdot \underline{Y}_{АИ}}{\underline{K}_{НА} \cdot (\dot{U}_A - \dot{U}_N)} \quad (16)$$

Подставим (16) в (8), тогда:

$$\dot{I}_B = \dot{U}_B \cdot \underline{Y}_{БИ} + (\dot{U}_B - \dot{U}_N) \cdot \frac{\dot{I}_A - \dot{U}_A \cdot \underline{Y}_{АИ}}{\underline{K}_{НА} \cdot (\dot{U}_A - \dot{U}_N)}$$

или

$$(\dot{I}_A - \dot{U}_A \cdot \underline{Y}_{АИ}) \cdot (\dot{U}_B - \dot{U}_N) = \underline{K}_{НА} \cdot (\dot{I}_B - \dot{U}_B \cdot \underline{Y}_{БИ}) \cdot (\dot{U}_A - \dot{U}_N) \quad (17)$$

Система уравнений (13), (15), (17) описывает текущее состояние присоединения кабель-ЭД при отличии значения продольной комплексной проводимости фазы А от значений фаз В и С. Для ее решения в реальном времени необходимо определять не только текущие значения векторов токов фаз и векторов напряжений фаз относительно земли, но и величину комплексного коэффициента несимметрии фазы А  $\underline{K}_{НА}$  (в частном случае по выражению (11)).

В общем случае несимметрия может иметь место одновременно по трем фазам. Тогда система уравнений состояния принимает вид [2]:

$$\dot{U}_A \cdot (\dot{U}_B - \dot{U}_N) \cdot \underline{K}_{НВ} \cdot \underline{Y}_{АИ} - \dot{U}_B \cdot (\dot{U}_A - \dot{U}_N) \cdot \underline{K}_{НА} \cdot \underline{Y}_{БИ} = \dot{I}_A \cdot (\dot{U}_B - \dot{U}_N) \cdot \underline{K}_{НВ} - \dot{I}_B \cdot (\dot{U}_A - \dot{U}_N) \cdot \underline{K}_{НА} \quad (18)$$

$$\dot{U}_B \cdot (\dot{U}_C - \dot{U}_N) \cdot \underline{K}_{НС} \cdot \underline{Y}_{БИ} - \dot{U}_C \cdot (\dot{U}_B - \dot{U}_N) \cdot \underline{K}_{НВ} \cdot \underline{Y}_{СИ} = \dot{I}_B \cdot (\dot{U}_C - \dot{U}_N) \cdot \underline{K}_{НС} - \dot{I}_C \cdot (\dot{U}_B - \dot{U}_N) \cdot \underline{K}_{НВ} \quad (19)$$

$$\dot{U}_A \cdot (\dot{U}_C - \dot{U}_N) \cdot \underline{K}_{НС} \cdot \underline{Y}_{АИ} - \dot{U}_C \cdot (\dot{U}_A - \dot{U}_N) \cdot \underline{K}_{НА} \cdot \underline{Y}_{СИ} = \dot{I}_A \cdot (\dot{U}_C - \dot{U}_N) \cdot \underline{K}_{НС} - \dot{I}_C \cdot (\dot{U}_A - \dot{U}_N) \cdot \underline{K}_{НА} \quad (20)$$

где  $\underline{Y}_{АН} = \underline{K}_{НА} \cdot \underline{Y}_Н$ ,  $\underline{Y}_{ВН} = \underline{K}_{НВ} \cdot \underline{Y}_Н$ ,  $\underline{Y}_{СН} = \underline{K}_{НС} \cdot \underline{Y}_Н$  - продольные комплексные проводимости фаз нагрузки присоединения;  $\underline{K}_{НА}$ ,  $\underline{K}_{НВ}$ ,  $\underline{K}_{НС}$  - комплексные коэффициенты несимметрии, учитывающие отличие продольных проводимостей фаз нагрузки от среднего (номинального) значения проводимости фазы нагрузки  $\underline{Y}_Н$ ;  $\dot{U}_N$  - напряжение нейтрали присоединения по отношению к земле:

$$\dot{U}_N = \frac{\dot{U}_A \cdot \underline{Y}_{АН} + \dot{U}_B \cdot \underline{Y}_{ВН} + \dot{U}_C \cdot \underline{Y}_{СН}}{\underline{Y}_{АН} + \underline{Y}_{ВН} + \underline{Y}_{СН}} = \frac{\dot{U}_A \cdot \underline{K}_{НА} + \dot{U}_B \cdot \underline{K}_{НВ} + \dot{U}_C \cdot \underline{K}_{НС}}{\underline{K}_{НА} + \underline{K}_{НВ} + \underline{K}_{НС}}$$

Запишем уравнения относительно неизвестных коэффициентов  $\underline{K}_H$ :

$$\underline{K}_{HA} \cdot [\dot{I}_B \cdot (\dot{U}_A - \dot{U}_N) - \dot{U}_B \cdot (\dot{U}_A - \dot{U}_N) \cdot \underline{Y}_{BI}] + \underline{K}_{HB} \cdot [\dot{U}_A \cdot (\dot{U}_B - \dot{U}_N) \cdot \underline{Y}_{AI} - \dot{I}_A \cdot (\dot{U}_B - \dot{U}_N)] = 0 \quad (21)$$

$$\underline{K}_{HB} \cdot [\dot{I}_C \cdot (\dot{U}_B - \dot{U}_N) - \dot{U}_C \cdot (\dot{U}_B - \dot{U}_N) \cdot \underline{Y}_{CI}] + \underline{K}_{HC} \cdot [\dot{U}_B \cdot (\dot{U}_C - \dot{U}_N) \cdot \underline{Y}_{BI} - \dot{I}_B \cdot (\dot{U}_C - \dot{U}_N)] = 0 \quad (22)$$

$$\underline{K}_{HA} \cdot [\dot{I}_C \cdot (\dot{U}_A - \dot{U}_N) - \dot{U}_C \cdot (\dot{U}_A - \dot{U}_N) \cdot \underline{Y}_{CI}] + \underline{K}_{HC} \cdot [\dot{U}_A \cdot (\dot{U}_C - \dot{U}_N) \cdot \underline{Y}_{AI} - \dot{I}_A \cdot (\dot{U}_C - \dot{U}_N)] = 0 \quad (23)$$

Для упрощения записи введем следующие обозначения:

$$\dot{I}_B \cdot (\dot{U}_A - \dot{U}_N) - \dot{U}_B \cdot (\dot{U}_A - \dot{U}_N) \cdot \underline{Y}_{BI} = \underline{a}_{11};$$

$$\dot{U}_A \cdot (\dot{U}_B - \dot{U}_N) \cdot \underline{Y}_{AI} - \dot{I}_A \cdot (\dot{U}_B - \dot{U}_N) = \underline{a}_{12};$$

$$0 = \underline{a}_{13};$$

$$0 = \underline{a}_{21};$$

$$\dot{I}_C \cdot (\dot{U}_B - \dot{U}_N) - \dot{U}_C \cdot (\dot{U}_B - \dot{U}_N) \cdot \underline{Y}_{CI} = \underline{a}_{22};$$

$$\dot{U}_B \cdot (\dot{U}_C - \dot{U}_N) \cdot \underline{Y}_{BI} - \dot{I}_B \cdot (\dot{U}_C - \dot{U}_N) = \underline{a}_{23};$$

$$\dot{I}_C \cdot (\dot{U}_A - \dot{U}_N) - \dot{U}_C \cdot (\dot{U}_A - \dot{U}_N) \cdot \underline{Y}_{CI} = \underline{a}_{31};$$

$$0 = \underline{a}_{32};$$

$$\dot{U}_A \cdot (\dot{U}_C - \dot{U}_N) \cdot \underline{Y}_{AI} - \dot{I}_A \cdot (\dot{U}_C - \dot{U}_N) = \underline{a}_{33}$$

Система уравнений относительно неизвестных коэффициентов несимметрии примет вид:

$$\underline{K}_{HA} \cdot \underline{a}_{11} + \underline{K}_{HB} \cdot \underline{a}_{12} = 0; \quad (24)$$

$$\underline{K}_{HB} \cdot \underline{a}_{22} + \underline{K}_{HC} \cdot \underline{a}_{23} = 0; \quad (25)$$

$$\underline{K}_{HA} \cdot \underline{a}_{31} + \underline{K}_{HC} \cdot \underline{a}_{33} = 0. \quad (26)$$

Решение полученной системы (24)-(26) возможно при известных значениях проводимостей изоляции фаз. Поэтому наиболее целесообразно использовать такую запись при предварительной настройке подсистемы оценки состояния изоляции.

На практике часто бывает, что проводимости изоляции фаз практически равны друг другу. Если принять, что проводимости изоляции всех трех фаз равны  $\underline{Y}_{AI} = \underline{Y}_{BI} = \underline{Y}_{CI}$  то при возникновении дефекта изоляции  $\underline{Y}_D$  в фазе В проводимость изоляции фазы В по отношению к земле:

$$\underline{Y}'_{BI} = \underline{Y}_{BI} + \underline{Y}_D, \quad (27)$$

а проводимость изоляции фаз А и С:

$$\underline{Y}_{AI} = \underline{Y}_{CI}. \quad (28)$$

Подставим (28) в (20):

$$\dot{U}_A \cdot (\dot{U}_C - \dot{U}_N) \cdot \underline{K}_{HC} \cdot \underline{Y}_{AI} - \dot{U}_C \cdot (\dot{U}_A - \dot{U}_N) \cdot \underline{K}_{HA} \cdot \underline{Y}_{AI} = \dot{I}_A \cdot (\dot{U}_C - \dot{U}_N) \cdot \underline{K}_{HC} - \dot{I}_C \cdot (\dot{U}_A - \dot{U}_N) \cdot \underline{K}_{HA},$$

откуда

$$\underline{Y}_{AI} = \frac{\dot{I}_A (\dot{U}_C - \dot{U}_N) \cdot \underline{K}_{HC} - \dot{I}_C (\dot{U}_A - \dot{U}_N) \cdot \underline{K}_{HA}}{\dot{U}_A (\dot{U}_C - \dot{U}_N) \cdot \underline{K}_{HC} - \dot{U}_C (\dot{U}_A - \dot{U}_N) \cdot \underline{K}_{HA}}. \quad (29)$$

С учетом того, что  $\underline{Y}_{AI}$  определено по выражению (29), а также с учетом выражения (27) найдем из (18) проводимость дефекта при наличии продольной несимметрии в фазе А:

$$\underline{Y}_D = \underline{Y}'_{BI} - \underline{Y}_{BI} = \frac{\dot{U}_A (\dot{U}_B - \dot{U}_N) \cdot \underline{K}_{HB} \cdot \underline{Y}_{AI} - \dot{I}_A (\dot{U}_B - \dot{U}_N) \cdot \underline{K}_{HB} + \dot{I}_B (\dot{U}_A - \dot{U}_N) \cdot \underline{K}_{HA}}{\dot{U}_B (\dot{U}_A - \dot{U}_N) \cdot \underline{K}_{HA}} - \underline{Y}_{BI}, \quad (30)$$

где напряжение смещения нейтрали присоединения:

$$\dot{U}_N = \frac{\dot{U}_A \cdot \underline{Y}_{AH} + \dot{U}_B \cdot \underline{Y}_{BH} + \dot{U}_C \cdot \underline{Y}_{CH}}{\underline{Y}_{AH} + \underline{Y}_{BH} + \underline{Y}_{CH}} = \frac{\dot{U}_A \cdot \underline{K}_{HA} + \dot{U}_B \cdot \underline{K}_{HB} + \dot{U}_C \cdot \underline{K}_{HC}}{\underline{K}_{HA} + \underline{K}_{HB} + \underline{K}_{HC}}. \quad (31)$$

На основании выполненного анализа и результатов математического моделирования различных режимов работы ЭД, установлены закономерности изменения продольных проводимостей фаз ЭД при наличии статической и динамической несимметрии. В соответствии с этими закономерностями в общем случае действительные значения комплексных продольных проводимостей фаз ЭД:

$$\underline{Y}'_A = \underline{k}_{SA} \cdot \underline{Y}_A [1 + \underline{k}_{DA} \cdot \sin(\omega_2 t + \psi_A)], \quad (32)$$

$$\underline{Y}'_B = \underline{k}_{SB} \cdot \underline{Y}_B [1 + \underline{k}_{DB} \cdot \sin(\omega_2 t + \psi_B)], \quad (33)$$

$$\underline{Y}'_C = \underline{k}_{SC} \cdot \underline{Y}_C [1 + \underline{k}_{DC} \cdot \sin(\omega_2 t + \psi_C)], \quad (34)$$

где:  $\underline{Y}_A = \underline{Y}_B = \underline{Y}_C$  - номинальные значения комплексных продольных проводимостей фаз ЭД;

$\underline{k}_{SA}, \underline{k}_{SB}, \underline{k}_{SC}$  - комплексные коэффициенты статической несимметрии соответственно фаз А, В, С;

$\underline{k}_{DA}, \underline{k}_{DB}, \underline{k}_{DC}$  - комплексные коэффициенты динамической несимметрии соответственно фаз А, В, С;

$\omega_2$  - частота тока обратной последовательности, обусловленного динамической несимметрией;

$\psi_A, \psi_B, \psi_C$  - начальная фаза динамической составляющей проводимости, при  $\psi_A=0$  сдвиг фазы В

$$\psi_B = \frac{2\pi}{3}, \text{ а сдвиг фазы С } \psi_C = -\frac{2\pi}{3}.$$

В общем случае учет несимметрии нагрузки при решении системы уравнений (18)-(20) заключается в определении и задании коэффициентов несимметрии  $\underline{K}_{НА}, \underline{K}_{НВ}, \underline{K}_{НС}$ . При технологической несимметрии численные значения коэффициентов определяются путем измерений на работающем или отключенном присоединении и вводятся вместе с номинальными параметрами в базу данных оборудования подстанции. В дальнейшем, в процессе эксплуатации степень несимметрии в любой момент времени, в том числе на работающем ЭД, может измениться, например из-за возникновения виткового замыкания, обрыва стержней обмотки ротора АД и т.д. В этих случаях для исключения ошибок в определении проводимостей изоляции возникшая несимметрия автоматически выявляется и учитывается. Способ учета определяется видом несимметрии. При учете динамической несимметрии обеспечивается соответствие значений коэффициентов несимметрии моменту определения мгновенных значений параметров текущего режима. Развитие дефектов, вызвавших несимметрию, также автоматически синхронно во времени учитывается путем определения и изменения коэффициентов несимметрии.

Учет в программе расчета статической и динамической несимметрии выполняется путем введения в расчет коэффициентов, которые определяются по соответствующим формулам.

В результате возникновения динамической несимметрии, также как и статической, появляется ток обратной последовательности. При статической несимметрии его амплитуда и фаза не изменяются во времени. При динамической несимметрии частота тока обратной последовательности отличается от частоты сети на величину, которая зависит от скольжения ЭД.

При технологической несимметрии, а также при возникновении статической несимметрии в рабочем режиме присоединения, коэффициенты несимметрии не изменяются во времени.

Динамическая несимметрия продольных проводимостей фаз нагрузки возникает вследствие вращения несимметричного поля ротора АД. Изменение во времени положения магнитной или механической несимметрии ротора относительно осей симметрии фаз обмоток статора приводит к изменению одновременно трех продольных проводимостей  $\underline{Y}_{АН}, \underline{Y}_{ВН}, \underline{Y}_{СН}$ .

При статической несимметрии предварительно определяется фаза присоединения, в которой возникла несимметрия. Например, если проводимость фазы А отличается от двух других, то коэффициенты определяются по выражениям:

$$\underline{K}_{НА} = 1 + \frac{3i_2}{i_1}, \underline{K}_{НВ} = 1, \underline{K}_{НС} = 1,$$

где  $i_1, i_2$  - векторы соответственно тока прямой и обратной последовательности.

При динамической несимметрии предварительно определяется частота тока обратной последовательности  $f_2$  и момент  $t$  времени расчета. Коэффициенты несимметрии определяются по выражениям:

$$\underline{K}_{НА} = 1 + 3 \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{|i_2|}{|i_1|} \sin 2\pi f_2 t, \underline{K}_{НВ} = 1 + 3 \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{|i_2|}{|i_1|} \sin \left( 2\pi f_2 t + \frac{2\pi}{3} \right), \underline{K}_{НС} = 1 + 3 \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{|i_2|}{|i_1|} \sin \left( 2\pi f_2 t - \frac{2\pi}{3} \right)$$

Для проверки адекватности разработанной математической модели присоединения ЭД выполнено сравнение результатов расчетов амплитуды тока обратной последовательности при моделировании витковых замыканий путем увеличения проводимости в одной фазе по выражению (32)-(34).

Витковые замыкания моделировались без учёта магнитодвижущей силы (МДС) замкнутых витков, в соответствии с выражением для фазы с замыканием:

$$\underline{Y}'_A = \underline{Y}_A \frac{1}{n-1},$$

где  $n$  - число замкнувшихся витков.

Сравнение выполнено с результатами, которые приведены в [3].

Таблица 1

Сопоставление результатов расчетов на математической модели присоединения с экспериментальными данными

n	Эксперимент		Расчет		Погрешность, %
	I <sub>2</sub> , А	I <sub>2</sub> , о.е.	I <sub>2</sub> , А	I <sub>2</sub> , о.е.	
0,1	4	0,036	0,084	0,035	2,8
0,2	9	0,082	0,182	0,077	6,1
0,3	14	0,127	0,295	0,125	1,6
0,4	22	0,2	0,43	0,182	9,0
0,5	33	0,3	0,591	0,25	16,7
0,6	44	0,4	0,788	0,333	16,7
0,7	57	0,52	1,034	0,438	15,8
0,8	73	0,66	1,35	0,571	13,5
0,9	93	0,845	1,772	0,75	11,2
1	110	1	2,362	1	0

Из табл. 1 следует, что при  $n \leq 0,1$  можно не учитывать МДС короткозамкнутых витков.

Несимметрия в виде междуфазных к.з. или обрывов фаз является кратковременной, т.к. эти повреждения выявляются релейной защитой и быстро отключаются. Поэтому влияние кратковременной несимметрии на метод определения параметров изоляции не учитывается.

В общем случае учет несимметрии нагрузки при решении системы уравнений (18)-(20) заключается в определении и задании коэффициентов несимметрии. При технологической несимметрии численные значения коэффициентов определяются путем измерений на работающем или отключенном присоединении и вводятся вместе с номинальными параметрами в базу данных оборудования УЭСД. В дальнейшем, в процессе эксплуатации степень несимметрии в любой момент времени, в том числе на работающем ЭД, может измениться, например из-за возникновения виткового замыкания, обрыва стержней обмотки ротора АД и т.д. В этих случаях для исключения ошибок в определении проводимостей изоляции возникшая несимметрия автоматически выявляется и учитывается. Способ учета определяется видом несимметрии. При учете динамической несимметрии обеспечивается соответствие значений коэффициентов несимметрии моменту определения мгновенных значений параметров текущего режима. Развитие дефектов, вызвавших несимметрию, также автоматически синхронно во времени учитывается путем определения и изменения коэффициентов несимметрии.

#### Выводы

1. Усовершенствован метод определения комплексных проводимостей изоляции за счет автоматического определения коэффициентов несимметрии нагрузки и учета статической и динамической несимметрии электродвигателей, что позволило повысить точность определения параметров дефектов изоляции.
2. Разработана структурная схема узла сети с электродвигателями, позволяющая выполнять проверку методов непрерывного определения параметров изоляции в рабочих режимах путем проведения вычислительных экспериментов при различной конфигурации сети.
3. Усовершенствована математическая модель присоединения кабель-электродвигатель, благодаря чему появилась возможность определять параметры рабочего режима при возникновении статической несимметрии (витковые замыкания в обмотке статора, технологическая несимметрия, дефекты междуфазной изоляции) и динамической несимметрии (нарушение симметрии воздушного зазора в ЭД, износ подшипников, обрывы стержней короткозамкнутой обмотки ротора АД).
4. Выполнен анализ различных видов статической и динамической несимметрии в фазах присоединения электродвигателей. Предложены соотношения для автоматического определения в рабочих режимах коэффициентов статической и динамической несимметрии, основанных на расчете отношения амплитуды тока обратной последовательности к амплитуде тока прямой последовательности, а также на анализе частоты тока обратной последовательности.

#### Список литературы

1. Гребченко Н.В. Метод непрерывного определения комплексных проводимостей изоляции в рабочих режимах электрических присоединений 6-10 кВ / Н.В. Гребченко // Электричество .- 2003. - №12. – С.24-29.
2. Гребченко Н.В. Определение параметров изоляции с учетом статической и динамической несимметрии нагрузки / Н.В. Гребченко, Д.В. Полковниченко, А.А. Сидоренко // Наукові праці Донецького нац. тех. університету. Серія: Електротехніка і енергетика, випуск 7(128): Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ». - 2007. - С. 241-244.
3. Корогодский В.И. Релейная защита электродвигателей напряжением выше 1 кВ / В.И. Корогодский, С.Л. Кужеков, Л.Б. Паперно - М.: Энергоатомиздат.- 1987.- 248 с.

*Представлен метод, который позволяет определять параметры сращиваний электродвигателя дефектов развязки в исправном состоянии. Предложена математическая модель сращивания кабельного электродвигателя.*

*The method is submitted which allows to define parameters of isolation defects electric motor joinings in working condition. The mathematical model of a cable-electric motor joining is offered.*