

Висновки. Синхронний двигун електромашинного агрегату екскаватора ЕКГ може бути використаний як компенсатор режиму мережі за реактивною потужністю, але різкозмінний режим роботи механізмів екскаватора та відповідно момент на валу впливають на стійкість синхронного двигуна.

У результаті аналізу встановлено, що на стійкість СД впливають механічні та електромагнітні моменти, а також Е.Р.С. (струм збудження), з урахуванням поточного кута δ .

Список літератури

1. Чеботаев, Н.И. Электрооборудование и электроснабжение горных работ: Учебник для вузов. / Н.И. Чеботаев. – М.: Горная книга, 2006. – 474 с.
2. Слодарж, М.И., Режимы работы, релейная защита и автоматика синхронных электродвигателей / М.И. Слодарж. – М.: Энергия, 1977. – 216 с.
3. Овчаренко, А.С.. Повышение эффективности электроснабжения промышленных предприятий / А.С. Овчаренко, Д.И. Розинский ; – К.: Техника, 1989. – 287 с.
4. Спосіб автоматичного регулювання збудження синхронного приводного двигуна багатомашинного агрегату екскаватора: пат. РФ, 2433521, МПК (2006.01) H02P7/34, H02P9/30, E02F9/20. / Малафеев С. І., Серебренников М. О. ; заяв. 04.05.2010 ; опубл. 10.11.2011, Бюл. №31 10.11.2011р.
5. Спосіб форсування струму збудження синхронного двигуна та пристрій для його реалізації: пат. України, 60652, МПК (2006.01)H02P9/10, H02P9/14. / Нізімов В.Б., Нізімов Р.В., Сторожко В.С.; заяв. 24.01.2003 ; опубл. 15.10.2003, Бюл. № 10
6. Овчаренко, Н.И. Автоматика электрических станций и электроэнергетических систем: Учебник для вузов / Н.И. Овчаренко // Под ред. А.Ф. Дьякова. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2000. – 504 с.
7. Калентиюнок, Е.В. Устойчивость электроэнергетических систем/ Е.В. Калентиюнок. – Минск: Техноперспектива, 2008. – 375 с.

Рекомендовано до друку проф. Разумним Ю.Т.

УДК 621.316.933.002.25

*А. Г. Ликаренко, канд. техн. наук, А.А. Петриченко
(Украина, Кривой Рог, Криворожский национальный университет)*

АППАРАТ ЗАЩИТЫ ОТ ТОКОВ УТЕЧКИ РУДНИЧНЫЙ ДЛЯ КОМБИНИРОВАННЫХ ШАХТНЫХ СЕТЕЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 380 И 220 В ТИПА БАЗУК-380/220

В последние десятилетия в горных машинах и механизмах угольных и рудных шахт нашли широкое применение регулируемые электроприводы переменного и постоянного токов, в которых скорость и момент регулируются полупроводниковыми преобразователями энергии, включенными между двигателями и питающей сетью. Это привело к образованию комбинированной сети, содержащей участки напряжения промышленной частоты 50 Гц, регулируемого постоянного (выпрямленного) напряжения 0–520 В и переменного регулируемого напряжения изменяемой частоты 0–70 Гц.

Выпуск аппаратов защиты от токов утечки для комбинированных сетей до настоящего времени не освоен. Применение в этих сетях аппаратов защиты от утечки типа АЗУР неправомерно, так как они разработаны только для сетей переменного тока 50 Гц на основе ГОСТ 22929-78 "Аппараты защиты от токов утечки рудничные для сетей напряжением до 1200 В", который на комбинированные сети не распространяется [1]. При применении аппаратов типа АЗУР в комбинированной сети нормированная электробезопасность на участках выпрямленного и регулируемого напряжения в принципе не обеспечивается.

Впервые для рудничных комбинированных сетей был разработан и освоен в производстве аппарат защиты от токов утечек типа БАЗУК 380/220, а изготовителем является СПТП "Рудоавтоматика" (Россия, г.Железногорск Курской обл.).

Бесконтактный аппарат типа БАЗУК предназначен для защиты человека от токов утечки в рудничных электрических сетях 380/220, содержащих или не содержащих полупроводниковые преобразователи, и для отключения электро-установок при снижении сопротивления изоляции сети ниже допустимого (критического) значения.

Аппарат изготавливается в климатическом исполнении УХЛ категории размещения 2 по ГОСТ 15150-69, но для работы при температуре $-30 - +45^{\circ}\text{C}$, относительной влажности $95\pm 3\%$ при температуре $+25^{\circ}\text{C}$ и атмосферном давлении от 730 до 1000 мм рт. столба.

Электропоставка та электроустаткування

Аппарат выполнен во влагонепроницаемом брызгозащитном исполнении со степенью защиты согласно ГОСТ 14254-50 соответственно IP54.

Техническая характеристика БАЗУК 380/220

1. Режим эксплуатации.....	непрерывный
2. Потребляемая мощность, В·А.....	30
3. Номинальное линейное напряжение участка сети переменного тока частотой 50 Гц (при емкости изоляции от 0,0 до 3,0 мкФ), В.....	380 или 220
4. Номинальное напряжение участка сети постоянного (выпрямленного) напряжения (при емкости изоляции от 0,0 до 0,5 мкФ), В, не более	520
5. Общая емкость изоляции комбинированной сети, мкФ, не более	3,0
6. Допустимые колебания напряжения питания от номинального значения, В.....	0,85–1,1
7. Значения отключаемых сопротивлений (установок) срабатывания при емкости изоляции сети, равной 0 мкФ:	
– трехфазная симметричная утечка, кОм, не менее	5,0
– трехполюсная симметричная утечка, кОм, не менее	5,0
– однофазная утечка, кОм, не более	14,0
– однополюсная утечка при выпрямленном напряжении 520 В, кОм, не более.....	20,0
8. Наибольшее значение длительного тока утечки, А:	
– при однофазной утечке.....	0,025
– при однополюсной утечке.....	0,04
9. Наибольшее значение кратковременного тока, А:	
– при однофазной утечке.....	0,1
– при однополюсной утечке.....	0,4
10. Собственное время срабатывания устройства, при однофазной или однополюсной утечке сопротивлением 1,0 кОм, с, не более	0,1
11. Отключающее сопротивление связи корпуса аппарата с корпусом подстанции, Ом, не более	10,0
12. Сопротивление изоляции сети, определяемое световым индикатором, кОм, не менее.....	20,0
13. Габаритные размеры, мм, не более	520x400x200
14. Масса, кг, не более	23
15. Исполнение рудничное нормальное.....	РН2

Устройство и принцип работы схемы

Аппарат защиты от токов утечки типа БАЗУК 380/220 состоит из стального цилиндра с крышкой и выемной частью, на которой смонтированы элементы схемы и печатные платы. Их крепление осуществляется с помощью болтов и направляющих штифтов.

На лицевой стороне выемной части расположены клемник для подключения аппарата к сети, клемник для переключения напряжения питания 380 или 220 В, блокировочная кнопка, препятствующая подаче напряжения на сеть при снятой крышке аппарата, кнопка "Проверка", тумблер выбора режима работы выходных цепей аппарата "автомат-контактор"; три сигнальных светодиода "сеть", "контроль изоляции", "авария".

Корпус имеет два кабельных вывода: для цепей питания и цепей подключения к корпусу подстанции. Снаружи корпуса расположен винт для стопорения выемной части аппарата, имеющий отверстия для пломбирования. Корпус снабжен пружинными амортизаторами.

Функциональная схема аппарата приведена на рис.1. Работает аппарат следующим образом. Напряжение, пропорциональное напряжению сети частотой 50 Гц и снимаемое с одной из обмоток трехфазного дросселя – трансформатора 1(ДТ), с помощью модулятора 8(МДС) преобразуется в сигнал 50 Гц, промодулированный по амплитуде частотой 10 Гц. Определяет работу модулятора сигнала 8(МДС) пересчетная схема 7(ПРС), присоединенная ко вторичной обмотке дросселя – трансформатора 1(ДТ). В моменты появления положительной полуволны питающего напряжения формируются сигналы, поступающие на вход счетчика пересчетной схемы 7(ПРС). С выхода дешифратора пересчетной схемы 7(ПРС) сигналы поступают на модулятор 8(МДС,) представляющий собой выпрямительный мост, работающий совместно с транзисторными ключами на первичную обмотку разделительного трансформатора напряжения 3(ТМ). В результате работы транзисторных ключей на обмотку 3(ТМ) подается либо полное напряжение, либо напряжение равное 0,5 амплитуды полного. В определенные моменты времени напряжение на обмотке 3(ТМ) минимальное (рис.2, а). В дальнейшем оперативный сигнал, снимаемый со вторичной обмотки трансформатора напряжения 3(ТНС), через обмотки компен-

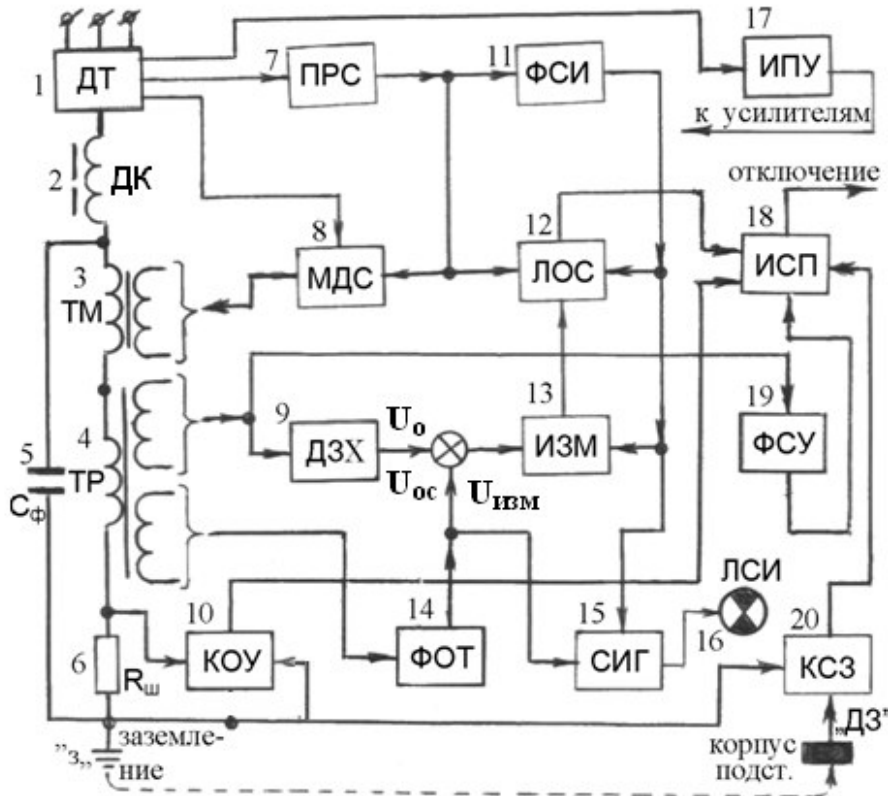


Рис.1. Функциональная схема аппарата защиты от утечек БАЗУК – 380/220:

- 1(ДТ) – трехфазный дроссель – трансформатор (фильтр присоединения); 2(ДК) – дроссель, компенсирующий емкостную составляющую тока утечки; 3(ТМ) – модулирующий трансформатор для создания оперативного тока; 4(ТР) – трансформатор выделения оперативного тока; 5(С_φ) – конденсатор фильтра оперативного тока; 6(Р_ш) – шунт выделения сигнала при однополосных токах утечках; 7(ПРС) – пересчетная схема для управления модулятором; 8(МДС) – модулятор сигнала – 50 Гц, модулированного по амплитуде частотой 10 Гц; 9(ДЗХ) – деформирование защитной характеристики для раздельного контроля сопротивлений изоляции и утечек; 10(КОУ) – контроль однополосных утечек на стороне выпрямленного напряжения; 11(ФСИ) – формирование селекторных импульсов длительностью 1 мс частотой 10 Гц для деблокирования измерительного органа; 12(ЛОС) – логическая обработка для задержки сигнала отключения от критического сопротивления изоляции (не создающего напряжения смещения нейтрали); 13(ИЗМ) – измерительный орган на основе компаратора, преобразующий аналоговый входной сигнал в дискретный логический сигнал на выходе; 14(ФОТ) – фильтрация оперативного тока; 15(СИГ) – индикатор уровня сопротивления изоляции; 16(ЛСИ) – лампа сигнальная о снижении общего уровня изоляции менее 20 кОм; 17(ИПУ) – источник питания операционных усилителей; 18(ИСП) – исполнительный орган для воздействия на отключающую катушку вводного коммутационного аппарата; 19(ФСИ) – форсировка срабатывания при однофазных утечках (создающих напряжение смещения нейтрали); 20(КСЗ) – контроль связи схемы с заземлением

сирующего дросселя 2(ДК) и трехфазного 1(ДК), с одной стороны, прикладывается к сети, а с другой, через обмотку трансформатора тока 4(ТР) и резистор 6(Р_ш) к земле. В результате сопротивление изоляции сети оказывается включенным последовательно с источником оперативного сигнала 3 (ТМ) через компенсирующий дроссель 2 (ДК).

При снижении общего уровня изоляции сети до критического значения напряжение нулевой последовательности U_0 в сети отсутствует. Поэтому в измерительном трансформаторе тока 4(ТР) выделяется только ток оперативного сигнала U_{oc} (рис.2, г), который после фильтрации в блоке 14(ФОТ) поступает на вход измерительного органа 13(ИЗМ) в виде сигнала синусоидальной формы частотой 10 Гц (рис. 2, б–г). Измерительный орган 13(ИЗМ) выполнен на операционном усилителе, на один вход которого подается измерительный сигнал, определяемый напряжением смещения нейтрали $U_{см,н}$, а на второй – опорное (запрещающее) напряжение $U_{опр}$ (рис. 2г), снижающееся в моменты существования селекторных импульсов длительностью 1,0 мс до эталонного значения $U_{эт}$, которое определяет уставку измерительного органа 13(ИЗМ) на критическое сопротивление изоляции $R_{и,кр}$. Такая логика работы измерительного органа 13(ИЗМ) обеспечивает дискретное измерение оперативного сигнала U_{oc} только в моменты существования селекторных импульсов. Измеряемое мгновенное значение оперативного сигнала в общем случае определяется выражением

$$U_{oc} = U_{max} \sin(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

где φ – угол сдвига напряжения U_{oc} относительно начала координат (рис. 2, в).

Для того, чтобы аппарат защиты контролировал лишь активную составляющую оперативного сигнала U_{oc} , вызванную снижением изоляции сети (рис. 2, г), селекторный импульс сдвинут относительно начала синусоиды оперативного сигнала U_{oc} на угол 90° . Положив $\omega t = 90^\circ$ из выражения (1) находим, что измеряемым сигналом будет активная составляющая оперативного сигнала $U_{oc.a}$, т.е.

$$U_{oc} = U_{max} \cos \varphi. \quad (2)$$

Уравнение (2) идентично выражению для активной составляющей, определяемой исходя из векторной диаграммы.

Если емкость изоляции отсутствует, то угол сдвига φ равен нулю (рис.2, в), а величина сигнала будет измеряться в моменты амплитудного значения (рис. 2, г). При наличии емкости изоляции сети оперативный сигнал возрастает по амплитуде и сдвигается на угол φ относительно селекторного импульса (рис. 2, в). В этом случае мгновенное значение оперативного сигнала измеряется величиной амплитуды, а определяется выражением (2), т.е. продолжает оставаться пропорциональным активному сопротивлению изоляции сети.

В моменты, когда измеряемое значение оперативного сигнала $U_{изм}$ (рис.2, г) превысит величину $U_{эт}$, то на выходе измеряемого органа 13(ИЗМ) появится единичный сигнал, поступающий на блок логической обработки сигнала 12 (ЛОС), на выходе которого сигнал появляется лишь после третьего входного сигнала. За счет этого достигнута требуемая помехоустойчивость аппарата. При поступлении сигнала на исполнительный орган 18(ИСП), последний воздействует на входной коммутационный аппарат, снимающий напряжение с сети.

При появлении в сети однофазных токов утечки напряжение смещения нейтрали $U_{см.н}$ определяется суммой напряжений оперативного сигнала U_{oc} и напряжения нулевой последовательности U_0 , т.е.

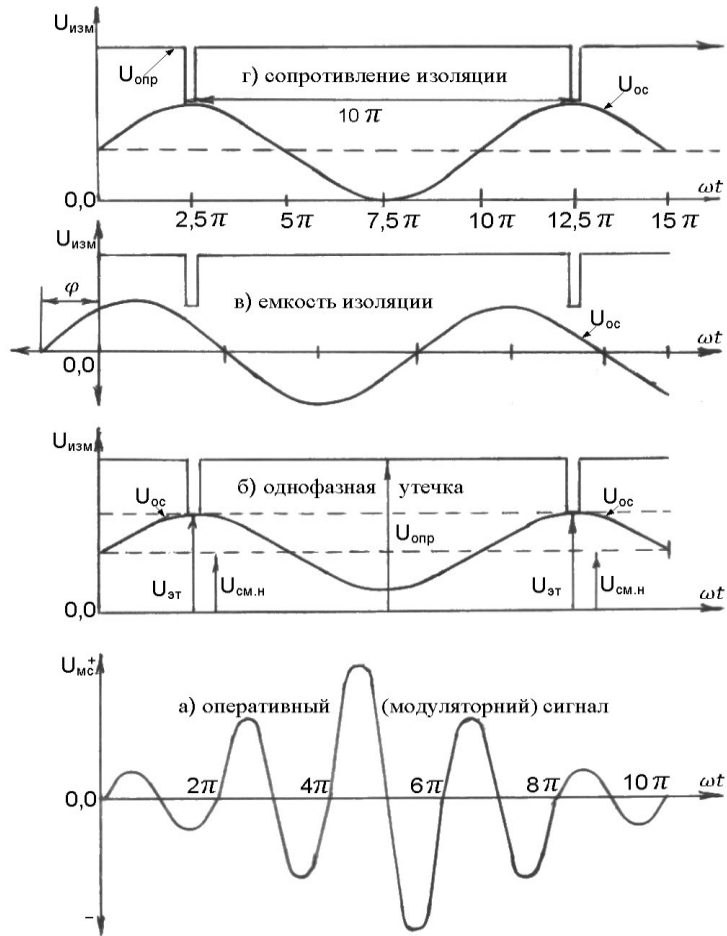


Рис.2. Временные диаграммы:
а – оперативного (модулированного) сигнала;
б – формирования измерительного сигнала при:
б – однофазной утечке; в – наличие емкости изоляции;
г – отключаемом (критическом) сопротивлении изоляции

$$\dot{U}_{\dot{n}0.i} = \dot{U}_{\dot{m}} + \dot{U}_i. \quad (3)$$

За счет появления напряжения нулевой последовательности U_0 , напряжение смещения нейтрали $U_{см.н}$ возрастает. Поэтому отключающее сопротивление однофазной утечки r_{y0} превышает отключающее (критическое) сопротивление изоляции $R_{u.кр}$, т.е. происходит деформирование защитной характеристики аппарата защиты. Увеличенное за счет U_0 напряжение смещения нейтрали $U_{см.н}$ поступает на блок входа деформирования защитной характеристики 9(ДЗХ), который срабатывает и формирует напряжение подпитки $U_{под}$, суммирующееся с напряжением оперативного сигнала U_{oc} , поступающего на вход измерительного органа (рис. 2, б). Величина напряжения подпитки $U_{под}$ выбрана такой, что обеспечивает внедрение соотношения:

$$U_{\dot{u}a} = U_{y0} (R_{e.\dot{e}\delta}) - U_{\dot{m}} (r'_{oi} = r'_{o\dot{n}0}), \quad (4)$$

где $U_{\tilde{m}} (r'_{\tilde{o}\tilde{i}} = r'_{\tilde{o}\tilde{n}\tilde{o}})$ – оперативное напряжение при сопротивлении уставки на однофазную токовую утечку;

$$r'_{\tilde{o}\tilde{n}\tilde{o}} = \frac{U_{\tilde{o}} K_{\xi}}{I_{\tilde{a}\tilde{e}\tilde{a}}} ; \quad (5)$$

$K_{\xi} \approx 1,6$ – коэффициент, который учитывает разброс отключающих сопротивлений из-за наличия дестабилизирующих факторов; U_{ϕ} – фазное напряжение; $I_{\text{д.д.}}$ – длительно-допустимый ток, равный 25 мА.

При выборе вставок на сопротивление изоляции и токов утечки в соответствии с формулой (4), требуемый коэффициент деформации защитной характеристики:

$$K_{\tilde{a}\tilde{o}} = \frac{r'_{\tilde{o}\tilde{n}\tilde{o}}}{R_{\tilde{e}\tilde{e}\tilde{o}}} \approx 4 . \quad (6)$$

Задержка сигнала с измерительного органа 13(ИЗМ) на исполнительный орган 18(ИСП), за счет включения блока логической обработки 12(ЛОС) осуществляется если отключающее сопротивление утечки r'_{yo} находится в диапазоне

$$1\hat{e}\hat{n} < r'_{\tilde{o}\tilde{i}} < r'_{\tilde{o}\tilde{n}\tilde{o}} \quad (7)$$

При этом время срабатывания аппарата защиты не нормируется. Для обеспечения норматива электробезопасности по собственному времени срабатывания [2]

$$t_{\text{cp}} \leq 0,1 \text{ с} \quad (8)$$

введен блок форсировки срабатывания 19(ФСУ), который реагирует на напряжение смещения нейтрали $U_{\text{см.н}}$ и имеет уставку:

$$U_{\tilde{o}\tilde{n}\tilde{o}} = U_{\tilde{n}\tilde{i}.i} (r'_{\tilde{o}\tilde{i}} = 1,0\hat{e}\hat{n}) \quad (9)$$

Он воздействует прямо на исполнительный орган 18(ИСП), минуя измерительный 13(ИЗМ).

При возникновении однополюсных токов утечек на стороне выпрямленного напряжения от сигнала, снимаемого с 6(РШ), срабатывает блок контроля одно-полюсных утечек 10(КОУ), а его выходной сигнал также прямо поступает на исполнительный орган 18(ИСП), минуя измерительный 13(ИЗМ).

При уровне сопротивления изоляции ниже 20 кОм блок сигнализации 15(СИГ) включает светодиод "контроль изоляции" 16(ЛСИ), который работает в прерывистом режиме.

В случае увеличения переходного сопротивления цепи присоединения оболочки аппарата к корпусу подстанции до значения 10 Ом срабатывает блок 20(КЗС) и через исполнительный орган 18(ИСП) отключает сеть независимо от уровня сопротивления ее изоляции.

Исполнительный орган 18(ИСП) может воздействовать как на автоматический выключатель, так и на контактор при соответствующем положении переключателя типа вводного коммутационного аппарата.

Защитные характеристики аппарата БАЗУК 380/220 экспериментально снимались на стенде, моделирующем параметры изоляции в сети в масштабе 1:1 на участках трехфазного напряжения 380 В частотой 50 Гц и выпрямленного регулируемого напряжения 0–520 В. В качестве источника выпрямленного напряжения использовался серийно выпускаемый преобразовательный аппарат типа ТЕ–4 200/460, работающий в номинальном режиме. Общие условия проведения испытаний соответствовали нормативным документам [2,4–6].

Основные свойства аппарата защиты от утечек определяются его защитными характеристиками, являющимися зависимостью отключающих сопротивлений однофазной или однополюсной утечки от дестабилизирующих факторов. В простых электрических сетях переменного или постоянного токов основными дестабилизирующими факторами являются параметры изоляции сети – активное сопротивление $R_{\text{из}}$ и емкость $C_{\text{из}}$. В комбинированной же сети при наличии преобразователей энергии установлена зависимость токов утечки еще и от режимов их работы, переходных процессов при коммутации тиристоров, асимметрии в каналах управления и динамики процессов управления [3]. Все это определяет импульсный колебательный характер токов утечки в сетях преобразования энергии с изменяющейся амплитудой, которая является случайной величиной при фиксированном значении угла управления преобразователей.

В результате ток утечки в комбинированной сети имеет гармонические и субгармонические составляющие. Гармонические составляющие образуются в сети при коммутации тиристоров и оказывают дестабилизирующее влияние на чувствительность и быстрдействие защиты от токов утечек. Субгармонические составляющие возникают за счет асимметрии в каналах управления и динамики процессов управления преобразователя и оказывают влияние на устойчивость работы аппарата защиты [3].

Таким образом, в комбинированной сети токи утечки имеют случайный характер и для их измерения и оценки необходимо руководствоваться методами теории вероятности и математической статистики [7].

Использованная нами методика проведения исследований для определения токов утечки, имеющих случайный характер, основывается на следующих положениях:

1. Сопротивление срабатывания аппарата защиты при однофазных токах утечки должно быть таким, чтобы при заданных отклонениях эксплуатационных факторов наибольший длительный ток утечки не превышал 0,025 А с учетом измерительного тока защиты [2]. Поэтому защитной характеристикой аппарата является зависимость наибольшего длительного тока, измеренного при предельно отключаемом сопротивлении однофазных токов утечки от возможных дестабилизирующих факторов, которая выражена в относительных единицах по базовой величине – длительно допустимому току 25 мА;

2. По нормативу электробезопасности устройства компенсации в диапазоне изменения емкости сети от 0,1 до 1,0 мкФ на фазу должны снижать кратковременный ток утечки до значения не более 0,1 А или ограничивать количество электричества до значения не более 50 мАс при изменении сопротивления однофазных токов утечки от 1 кОм до 60% сопротивления срабатывания [2]. Поэтому защитной характеристикой аппарата защиты от токов утечек является еще и зависимость кратковременного тока от дестабилизирующих факторов, выраженная в относительных единицах по базовой величине – значению допустимого кратковременного тока 100 мА. Кратковременным током утечки называется установившийся ток, протекающий через сопротивление токов утечки, равное минимальному расчетному сопротивлению тела человека, при сопротивлении изоляции не менее сопротивления срабатывания и емкости в пределах рабочего диапазона в течение времени отключения сети защитой и действия ЭДС выбега отключенных электродвигателей [2].

3. Длительные и кратковременные токи определялись в процессе прямых измерений их значений на физической модели электрической сети, где моделировались однофазные токи утечки в масштабе 1:1. При этом определялись отключения однофазных и симметричных трехфазных токов утечки, величины длительных и кратковременных токов при однофазной утечке, время срабатывания аппарата при утечках на стороне переменного и выпрямленного токов сети, а также влияние на ток утечки различных дестабилизирующих факторов: емкости и сопротивления изоляции до и после преобразователя, колебаний питающего напряжения и угла регулирования преобразователя.

В качестве источника питания модели электрической сети использовался трехфазный трансформатор, выходное напряжение которого переключателем отпаяк устанавливалось в пределах $(0,85-1,1)U_{ном}$. Параметры изоляции сети моделировались с помощью резисторов и конденсаторов. Регулируемый электропривод постоянного тока был собран на базе серийного агрегата ТЕ4-200/460. Испытания выполнялись методом активного эксперимента.

При определении сопротивлений срабатывания аппарата защиты от токов утечек сопротивления, имитирующие появление однофазных токов утечки, плавно снижались от значения, заведомо не вызывающего срабатывание аппарата защиты до момента его срабатывания. Степень изменения сопротивления токов утечки не превышала 1,0 % от уставки срабатывания, а скорость снижения соответствовала 1,0 ступени в секунду.

На время испытаний аппарат защиты изолировался от земли с целью создания искусственной нулевой точки (земли).

4. Защитная характеристика для длительных токов при однофазных токах утечки определялась при включенном и отключенном преобразователе.

При отключенном преобразователе отключающие сопротивления однофазных токов утечки определялись при напряжении сети 380 В, в диапазоне емкости изоляции сети от 0,0 до 3,0 мкФ и активном сопротивлении изоляции сети от бесконечности до отключающего (критического) значения $R_{и,кр}$ для каждой фазы сети в отдельности. При этом регистрировались значения сопротивлений срабатывания однофазных токов утечки и ее ток при различных параметрах емкости и изоляции сети.

Испытуемый преобразователь подключался к сети напряжением 380 В и диапазоне емкости 0–3,0 мкФ. Напряжение преобразователя устанавливалось 0, 200, 400 В, а емкость изоляции на стороне выпрямленного напряжения – 0; 0,25; 0,5 мкФ. Сопротивление изоляции сети принималось равным бесконечности. Испытания проводились для фазы А. При этом регистрировались значения отключающих сопротивлений однофазных токов утечки и величины длительных токов утечки. Максимальная общая емкость изоляции сети не превышала 3,0 мкФ.

Совокупность указанных выше измерений длительного тока однофазной утечки образовала выборку для определения защитной характеристики по длительному току на участке напряжения промышленной частоты.

5. Выборка значений для определения защитной характеристики по длительному току однополюсной утечки осуществлялась в процессе испытаний на участке сети постоянного напряжения при следующих условиях. Испытания проводились при номинальном напряжении питания 380 В в диапазоне емкости изоляции сети 0–3,0 мкФ. Напряжение преобразователя установилось 200 и 460 В. Емкость изоляции участка выпрямленного напряжения составила 0, 0,25, 0,5 мкФ, а сопротивление изоляции – бесконечность. Измерения тока утечки проводились для каждого полюса отдельно.

6. Так как экспериментальные выборки длительного тока на участках переменного и выпрямленного напряжения являются не равнозначными и принадлежат к различным генеральным совокупностям, то результат измерений для всей комбинированной сети представлял собой взвешенные средние значения токов утечки с учетом статистических весов выборок на участках сети [7].

7. Результаты прямых измерений длительного тока как случайной величины, записывались в следующей форме [7]:

$$I_{\ddot{a}\ddot{e}} = I_{\ddot{a}\ddot{e}}^* \pm \varepsilon; \quad \gamma = 0,95; \quad n_{\xi\zeta i} = \sum_{j=0}^n n_j, \quad (10)$$

где $I_{\ddot{a}\ddot{e}}^* = \bar{I}_{\ddot{a}\ddot{e}} \frac{100\%}{25 \text{ мА}}$ – длительный ток в относительных единицах по базовой величине – длительно до-

пустимому току 25 мА; $\bar{I}_{\ddot{a}\ddot{e}}$ – наиболее вероятное значение взвешенного среднего значения длительного тока; $\gamma = 0,95$ – выбранная двухсторонняя вероятность (достоверность) для технических измерений; ξ – доверительная граница погрешности измерения, образующая зону верхнего $I_{\text{дл.в}}$ и нижнего $I_{\text{дл.н}}$ значений длительного тока [7]; $\dot{I}_{\ddot{a}\ddot{e}.\hat{a}} = \bar{I}_{\ddot{a}\ddot{e}} + \xi$; $\dot{I}_{\ddot{a}\ddot{e}.\hat{a}} = \bar{I}_{\ddot{a}\ddot{e}} - \xi$; $n_{\text{изм}}$ – объем выборки, представляющий собой сумму единичных измерений n_i .

Для наиболее дестабилизирующего фактора емкости изоляции сети $C_{\text{из.с}}$ установлена связь $\dot{I}_{\text{дл}} = f(C_{\text{из.с}})$ как линейная зависимость по способу наименьших квадратов [7]:

$$\dot{I}_{\text{дл}} = f(C_{\text{из.с}}) = a_0 + a_1 C_{\text{из.с}}, \text{ мкФ} \quad (12)$$

где a_0 и a_1 – коэффициенты линейной регрессии [7].

Для определения ширины полосы, характеризующей погрешность линейной регрессии (12) по обе стороны от прямой откладывались значения выборочного среднего квадратичного отклонения функции (12):

$$\pm S(I_{\text{дл}}^* = f(C_{\text{из.с}})) = \frac{S}{n_{\xi\zeta i}}, \quad (13)$$

где S – среднее квадратичное отклонение точек регрессии (12) [7].

8. Для выявления установившихся кратковременных токов однофазной и однополюсной утечки производились испытания по определению выборок этих токов на участках переменного и выпрямленного напряжений отдельно.

Первая выборка кратковременного тока проводилась на участке переменного тока промышленной частоты при сопротивлении тока утечки 1,0 кОм, напряжении сети 380 В и ее емкости в пределах (0–3,0) мкФ.

Напряжение преобразователя принималось 0; 260; 400 В, а значение емкости изоляции, присоединенного к нему участка сети – 0; 0,25; 0,5 мкФ. При отключенном преобразователе кратковременные токи определялись для каждой фазы в отдельности. Во всех остальных случаях кратковременные токи утечки определялись для одной фазы, той в которой были зарегистрированы наибольшие значения токов в предыдущем опыте. Измерения кратковременного тока выполнялись при двух значениях сопротивления изоляции: – бесконечном; – отключающем (критическом) значении – 3,5 кОм.

Вторая выборка кратковременного тока осуществлялась на участке выпрямленного напряжения при следующих условиях. Напряжение питания сети 380 В, а емкость ее изоляции 0; 1,5; 3,0 мкФ. Напряжение на этом участке установилось 200 и 460 В, а значение его емкости изоляции – 0; 0,25; 0,5 мкФ. Кратковременные токи определялись при утечке через сопротивление 1,0 кОм на положительном и отрицательном полюсах отдельно, а сопротивление изоляции этого участка принималось равным бесконечности и значению отключаемого (критического) сопротивления – 3,5 кОм.

Методика обработки результатов измерения кратковременного тока была аналогичной как и для длительного (см. п.7) и базировалась на принципах метрологической обработки результатов технических измерений, изложенных в работе [7].

Защитные характеристики аппарата БАЗУК 380/220, полученные на основе представленной выше методики, приведены в табл.1 – длительный ток; табл.2 – кратковременный ток.

Електропостачання та електроустаткування

Из таблиц видно защитных характеристик аппарата БАЗУК 380/220 видно, что в любой точке комбинированной сети обеспечивается электробезопасность по критериям, не превышающим длительного и кратковременного токов по нормативу соответственно 25 и 100 мА.

Таблица 1

Защитная характеристика по длительному току утечки на участках напряжений промышленной частоты, выпрямленного тока и всей комбинированной сети

Наименование выборки	Уравнение линейной регрессии связи длительного тока и емкости изоляции сети (12)	Дисперсия точек регрессии (13)	Значения длительного тока однофазной и однополюсной утечек по уравнениям (10) и (11)				
			$I_{дл}^*$	$\pm \xi$	$I_{дл.в}^*$	$I_{дл.н}^*$	$n_{изм}$
Однофазная утечка	$\dot{I}_{дл}^{*-} = 46,8 - 5C_{из}, \text{ мкФ}$	2,88	39,1	$\pm 1,4$	40,5	37,7	140
Однополюсная утечка	$\dot{I}_{дл}^{*=} = 51,9 + 2,98C_{из}, \text{ мкФ}$	1,26	56,16	$\pm 0,92$	57,08	55,24	80
Сложение выборок по сети	$\dot{I}_{дл}^{*(с)} = 48,4 - 2,16C_{из}, \text{ мкФ}$	1,5	45,4	$\pm 0,54$	45,94	44,86	220

Таблица 2

Защитная характеристика по кратковременному току утечки на участках промышленной частоты, выпрямленного тока и всей комбинированной сети

Наименование выборки	Уравнение линейной регрессии связи кратковременного тока и емкости изоляции сети (12)	Дисперсия точек регрессии (13)	Значения кратковременного тока однофазной и однополюсной утечек по уравнениям (10) и (11)				
			$I_{кр}^*$	$\pm \xi$	$I_{кр.в}^*$	$I_{кр.н}^*$	$n_{изм}$
Однофазная утечка	$\dot{I}_{кр}^{*-} = 61,97 + 4,58C_{из}, \text{ мкФ}$	18,36	69,64	$\pm 3,64$	73,28	66,0	90
Однополюсная утечка	$\dot{I}_{кр}^{*=} = 59,4 + 20,9C_{из}, \text{ мкФ}$	8,23	90,75	$\pm 6,24$	96,99	84,51	72
Сложение выборок по сети	$\dot{I}_{кр}^{*(с)} = 54,64 + 13,08C_{из}, \text{ мкФ}$	16,4	78,62	$\pm 2,36$	80,98	76,26	162

Примечание: $I_{кр}^*$ – кратковременный ток в относительных единицах по базовой величине – допустимому значению 100 мА [2].

Выводы

1. Для шахтных электрических сетей 380 и 220 В создан и освоен в производстве рудничный аппарат защиты от токов утечки БАЗУК 380/220, обеспечивающий нормативную электробезопасность в любой точке комбинированной сети, содержащей регулируемые электропривода переменного и постоянного токов.
2. Схема аппарата работает на переменном оперативном токе частотой 10 Гц, а для деформирования защитной характеристики на вход измерительного органа подается сумма сигналов, пропорциональных активной составляющей оперативного тока и напряжению нулевой последовательности.
3. Защитная характеристика аппарата БАЗУК 380/220 обеспечивает нормативы электробезопасности по длительному и кратковременному токам в любой точке сети, т. к. при доверительной вероятности 0,95 их наибольшие значения не превышают соответственно 46 и 81 % от нормативного значения.

Список литературы

1. Товстик Ю.В. Проблемы защиты от утечек тока на землю распределительных угольных шахт с силовыми полупроводниковыми элементами /Товстик Ю.В., Стоян В.Н., Савицкий В.Н. // Гірн. електромеханіка та автоматика: наук.– техн. зб. – 2005. – Вип.74. С. 36–42.
2. ГОСТ 22929-78. Аппараты защиты от токов утечки рудничные для сетей напряжением до 1200 В. Введ. 1979-01-01.
3. Киампо Е.М. Исследования и разработка аппаратуры защиты от утечек тока для тиристорного электропривода горных машин: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Восточный НИИ по безопасности работ в горной промышленности [ВостНИИ]. – Кемерово, 1985 г., – 24 с.
4. ГОСТ 24754-81. Электрооборудование рудничное нормальное. Общие технические требования и методы испытаний. Введен 01.01.82. Издание – декабрь 2003г.
5. ГОСТ 12.4.155-85. Устройства защитного отключения. Классификация. Общие технические требования. Введ. 1986-01-01.

6. ГОСТ 12.1.03-82. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов Введ. 1983-07-01.

7. Кемпо К.Г. Метрологическая обработка результатов технических измерений: справ. пособие. – К.: Техніка, 1987. – 128 с.

Рекомендовано до друку проф. Разумним Ю.Т.

УДК 661.331:621.311

В.Г. Сыченко, д-р техн. наук

(Украина, Днепропетровск, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени ак. В.Лазаряна)

МЕТОДОЛОГИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОТКЛОНЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЯ В ПОДСИСТЕМАХ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Актуальность проблемы

Протекание энергообменных процессов в системе тягового электроснабжения имеет случайный нестационарный характер, а их характеристики в любой момент времени являются случайными величинами. Математическая модель случайного процесса строится на основе ансамбля его реализации, а свойства описываются вероятностными характеристиками.

Закон распределения случайной величины полностью характеризует ее изменение во времени [1], то есть может быть однозначно применен в качестве модели после определения соответствующих числовых характеристик. Кроме распределения вероятности для описания случайных процессов также применяются корреляционные и спектральные функции и аналитические выражения с порядком не больше 5, при этом наиболее часто используется модель третьего порядка [2].

Определение характеристик нестационарных случайных процессов представляет сложную задачу, особенно в условиях ограниченной выборки. На сегодня не существует единой методологии, согласно которой возможно анализировать свойства нестационарного процесса любого типа, используя его индивидуальную реализацию. Обобщенный подход к решению указанной задачи заключается во введении гипотезы о специфическом характере нестационарного исследуемого процесса, который рассматривается как результат действия некоторых детерминированных факторов на стационарный случайный процесс. При таком подходе, обычно, используются разные виды моделей, которые комбинируют или обобщают для наибольшего соответствия реальным физическим условиям. Отметим, что наибольшее распространение для описания нестационарных процессов в технике получила аддитивная модель вида [3] :

$$x(t) = M(t) + \varepsilon(t) \quad (1)$$

где $M(t)$ – математическое ожидание, которое зависит от времени; $\varepsilon(t)$ – стационарный нормальный процесс с известными параметрами.

Если у нас есть n реализаций нестационарного случайного процесса $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$, то, измерив в фиксированный момент времени значения переменных и усреднив их, можно определить оценку математического ожидания:

$$m_x^*(t_1) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i(t_1) \quad (2)$$

Многочисленное повторение аналогичных опытов в одинаковых условиях для разных моментов t дает ряд дискретных значений $m_x^*(t_1)$, что позволяет после интерполяции получить функцию $m_x^*(t_1)$. В большинстве случаев существует необходимость определения математического ожидания нестационарного случайного процесса по одной реализации. Решение данной задачи осуществляется методом сглаживания [2]. Обобщение этого метода на нестационарные процессы и определение условий применимости выполнены Пугачевым В.С. [1]. Процедура сглаживания осуществляется с помощью линии, ординаты которой определяются как :