

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОДЗЕМНОЙ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ, И СИНТЕЗ НА ЕЕ ОСНОВЕ УСТРОЙСТВА ЗАЩИТЫ ОТ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ

Лавшонок А.В., ассистент,
Донецкий национальный технический университет

Разработана математическая модель подземной высоковольтной электрической сети и синтезирована структурная схема селективного устройства защиты от однофазных замыканий на землю.

The mathematical model of a underground high-voltage electric network is developed and the block diagram of the selective device of protection against single-phase short circuits on the ground is synthesized.

Разработка современных устройств селективной защиты от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) для угольных шахт невозможна без учета динамических характеристик подземной высоковольтной электрической сети. Это связано с тем, что повреждения изоляции электрооборудования часто сопровождается возникновением дугowych и перемежающихся замыканий на землю, при которых возникают сосредоточенные токи нулевой последовательности с существенной долей высших гармоник. При этом токи нулевой последовательности протекают во всей сети. Контролируя токи нулевой последовательности, в различных точках сети, имеется возможность определить мгновенные значения сосредоточенного тока однофазного замыкания в зоне действия защиты.

Разрабатывать устройства защиты от ОЗЗ необходимо на основе аналитических зависимостей, связывающих параметры нулевой последовательности, контролировать которые непосредственно имеется возможность, с величинами токов ОЗЗ в зоне действия защит. Такие зависимости будут определять математическую модель подземной высоковольтной электрической сети.

Для разработки математической модели подземной высоковольтной электрической сети наиболее удобно пользоваться операторным методом, основанным на преобразовании Лапласа [1]. Поскольку зависимости в операторной форме позволяют непосредственно получить на их основе необходимую структурную схему уст-

ройства защиты с заданными параметрами. При этом необходимо рассматривать селективные защиты, как с поперечной, так и с продольной селективностью. На основании распределения токов нулевой последовательности в сети изображение тока ОЗЗ в зоне действия защиты связано с параметрами нулевой последовательности в сети следующим образом

$$i_{I\zeta\zeta}^0(p) = i_I^0(p) - i_E^0(p) + f(U^0(p), i_E^0(p), C, R_{\alpha}, R_{\zeta}, L) \quad (1)$$

где: $U^0(p)$ – изображение напряжения нулевой последовательности в начале защищаемого участка;

C – емкость изоляции защищаемого участка;

$R_{\text{ж}}$ – сопротивление жил кабеля защищаемого участка;

R_3 – сопротивление цепи заземления;

L – индуктивность жил защищаемого участка сети;

$i_{H}^0(p)$ – изображение тока нулевой последовательности в начале защищаемого участка сети;

$i_{K}^0(p)$ – изображение тока нулевой последовательности, в конце защищаемого участка (только для защит с продольной селективностью).

В связи с невозможностью непосредственного измерения тока нулевой последовательности в неповрежденной изоляции защищаемого участка сети в выражении 1 он учитывается как функция напряжения нулевой последовательности и тока нулевой последовательности в конце защищаемого участка с учетом параметров защищаемого участка.

Защищаемый участок электрической сети является линией с распределенными параметрами. В подземных выработках угольных шахт применяются магистральные кабельные линии, протяженность которых, составляет не более 2-3 километров. В связи с этим для получения аналитических зависимостей связывающих токи нулевой последовательности в неповрежденной изоляции защищаемого участка с контролируемыми напряжениями и токами нулевой последовательности целесообразно заменить линию с распределенными параметрами, эквивалентной схемой с сосредоточенными параметрами. При этой замене необходимо, чтобы погрешность не превысила допустимой величины. Проведенные теоретические исследования показывают, что для устройств защиты от однофазных замыканий на землю погрешность в определении тока ОЗЗ более 50% может привести к несрабатыванию устройства при возникновении соответствующей аварийной ситуации в зоне действия защиты, а погрешность более

25% может привести к неселективной работе и как следствие необоснованному срабатыванию. В связи с этим допустимой следует считать погрешность не более 25%. Кроме того, следует минимизировать число динамических элементов схемы замещения с целью упрощения полученных зависимостей, что в свою очередь позволит упростить конструкцию устройства защиты.

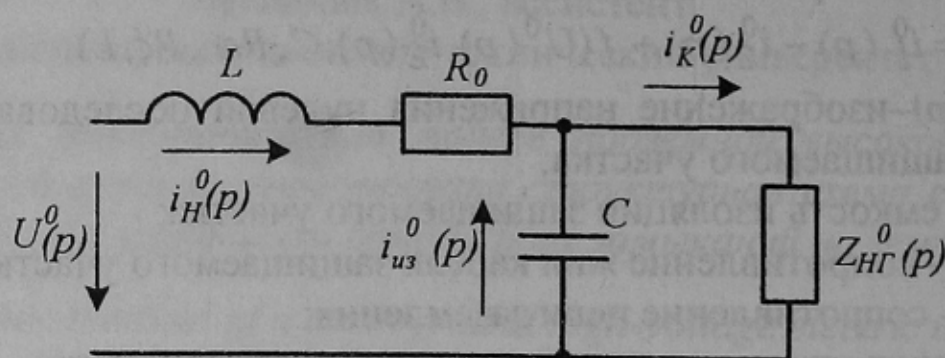


Рисунок 1 – Эквивалентная схема участка сети

На рисунке 1 показана эквивалентная схема защищаемого участка сети. В данной схеме распределенные параметры заменены эквивалентными сосредоточенными. На схеме рисунка 1: $Z_{нг}^0(p)$ – сопротивление нулевой последовательности элементов сети, питаемых от защищаемого участка, R_0 – сопротивление нулевой последовательности защищаемого участка сети

$$R_0 = 3 \cdot R_C + R_{\mathcal{E}} \quad (2)$$

Замена линии с распределенными параметрами эквивалентной схемой, приведенной на рисунке 1, вносит погрешности в аналитические выражения для определения величины тока нулевой последовательности в неповрежденной изоляции защищаемого участка. На рисунке 2 приведена зависимость для погрешности определения тока нулевой последовательности в изоляции от частоты связанной с такой заменой.

Зависимость была построена для кабельной линии, протяженностью 3 км с кабелем сечением жилы 70 мм^2 . Для получения зависимости, изображенной на рисунке 1 был использован пакет MatLAB (фирмы MathWork Inc).

Повышение погрешностей при увеличении частоты контролируемых значений токов однофазного замыкания на землю обуславливает необходимость применения фильтров низкой частоты с полосой пропускания не более чем 1000Гц для всех контролируемых устрой-

ствам защиты параметров нулевой последовательности. При условии применения фильтра низкой частоты замена линии с распределенными параметрами эквивалентной схемой замещения изображенной на рисунке 1 не приведет к возникновению дополнительных погрешностей превышающих допустимые.

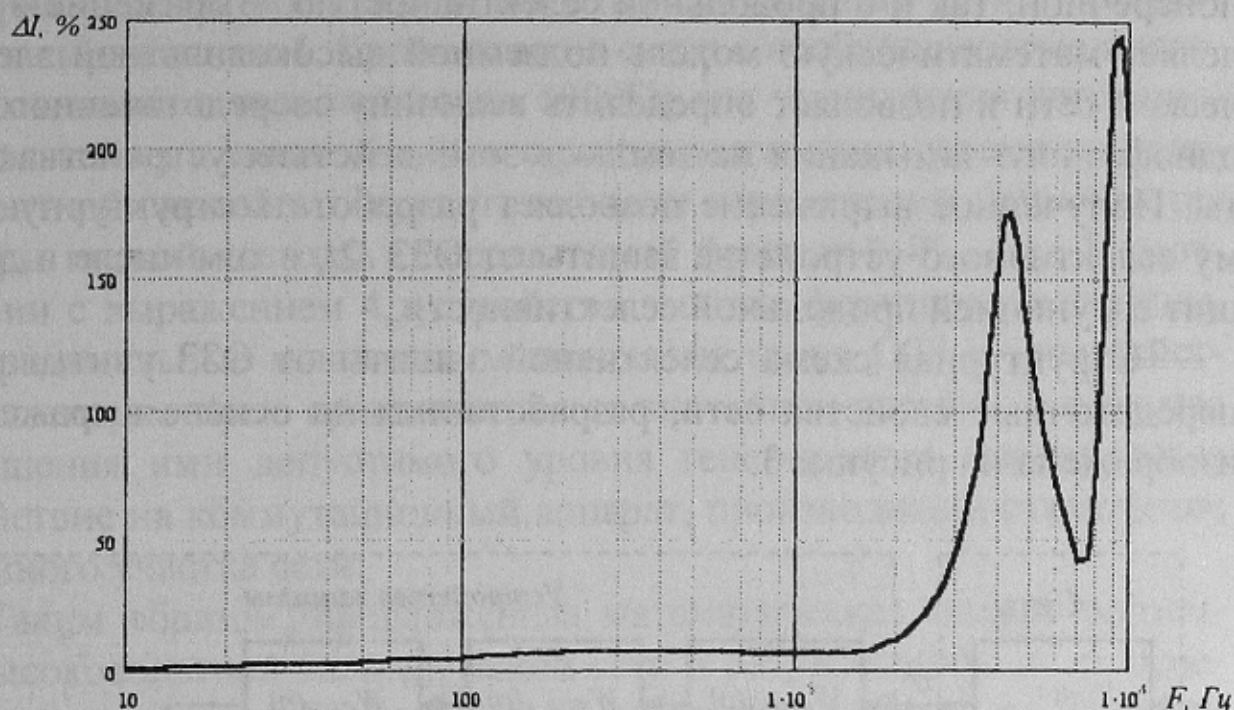


Рисунок 2 – Погрешности определения тока ОЗЗ с использованием модели сети

Таким образом, для эквивалентной схемы замещения подземной высоковольтной электрической сети изображенной на рисунке 1 было получено выражение для определения изображения тока нулевой последовательности в изоляции защищаемого участка сети.

$$i_{\dot{e}\zeta}^0(p) = i_{\dot{E}}^0(p) \cdot \frac{p^2 LC + pR_0C}{p^2 LC + pR_0C + 1} - U^0(p) \cdot \frac{pC}{p^2 LC + pR_0C + 1} \quad (3)$$

После преобразования выражения 1 с использованием зависимости 3 полученной на основе эквивалентной схемы замещения защищаемого участка сети было получено выражение 4 для определения изображения тока однофазного замыкания на землю в зоне действия защиты справедливое для частот менее 1000Гц.

$$i_{\dot{I}\zeta\zeta}^0(p) = i_I^0(p) - U^0(p) \cdot \frac{pC}{p^2 LC + pR_0C + 1} - i_{\dot{E}}^0(p) \cdot \left(1 - \frac{p^2 LC + pR_0C}{p^2 LC + pR_0C + 1}\right)$$

Выражение 4 позволяет определить изображение тока однофазного замыкания на землю в зоне действия защиты с учетом передаточных свойств подземной высоковольтной электрической сети и, по сути, определяет структурную схему селективного устройства защиты от ОЗЗ. При этом данное выражение справедливо как для защит с поперечной, так и с продольной селективностью. Выражение 4 определяет математическую модель подземной высоковольтной электрической сети и позволяет определить величину сосредоточенного тока однофазного замыкания на землю в зоне действия устройства защиты. Полученное выражение позволяет разработать структурную схему селективного устройства защиты от ОЗЗ [2], в том числе и для защит с функцией продольной селективности.

Структурная схема селективной защиты от ОЗЗ учитывающая передаточные свойства сети, разработанная на основе выражения 4 изображена на рисунке 3.

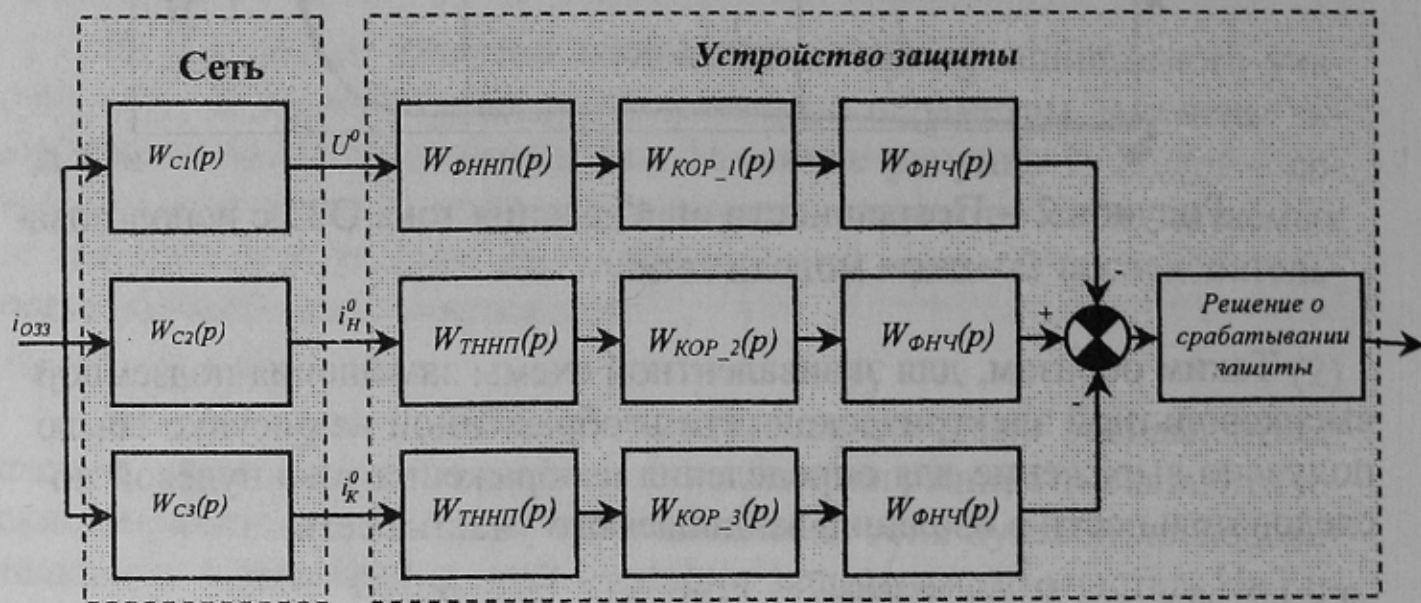


Рисунок 3 – Структурная схема селективного устройства защиты от однофазных замыканий на землю

На структурной схеме передаточные свойства сети учтены соответствующими передаточными функциями $W_{C1}(p)$, $W_{C2}(p)$, $W_{C3}(p)$ характеризующие зависимости между током ОЗЗ в зоне действия защиты и напряжением и токами нулевой последовательности в разных участках сети. Эти зависимости определяются распределением тока нулевой последовательности в сети при возникновении однофазных замыканий. Напряжения и токи нулевой последовательности контролируются при помощи фильтров тока и напряжения нулевой последовательности соответственно с передаточными функциями $W_{ТННП}(p)$

и $W_{\text{ФНП}}(p)$. Для коррекции динамических погрешностей вносимых фильтрами нулевой последовательности и собственно элементами сети (см. выражение 4) в структурной схеме устройства защиты предусмотрены корректирующие элементы, передаточные функции которых $W_{\text{КОР}_1}(p)$, $W_{\text{КОР}_2}(p)$ и $W_{\text{КОР}_3}(p)$ определяются параметрами фильтров нулевой последовательности и элементами сети в соответствии с выражением 4. Кроме этого в связи с необходимостью подавления сигналов с частотой выше 1000Гц для уменьшения погрешностей связанных с заменой линии с распределенными параметрами эквивалентной схемой с сосредоточенными параметрами применяются фильтры низкой частоты с передаточной функцией $W_{\text{ФНЧ}}(p)$. В соответствии с выражением 4, устройство защиты формирует величины, пропорциональные мгновенным значениям токов ОЗЗ в зоне действия защиты, которые сравниваются со значением уставки, и в случае превышения ими допустимого уровня генерируется отключающее воздействие на коммутационный аппарат, производящий отключение аварийного участка сети.

Таким образом, предложенная математическая модель подземной высоковольтной электрической сети и разработанная на ее основе структурная схема селективного устройства защиты от однофазных замыканий на землю позволяют создавать новые устройства защиты, в том числе и с функцией продольной селективности. При этом математическая модель учитывает распределение токов нулевой последовательности в сети, и отношения между токами и напряжениями нулевой последовательности в различных точках сети и токами нулевой последовательности в неповрежденной изоляции защищаемого участка сети.

Список источников.

1. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування. Підручник. – К.: Либідь, 1997. – 544 с.
2. Савицкий В.Н. Структурный синтез защит от однофазных замыканий на землю. / Высоковольтные рудничные аппараты: Сборник научных трудов ВНИИВЭ. – Донецк, 1989. – с. 63-70.