

ОПРЕДЕЛЯЕМОСТЬ ПОВРЕЖДЕННОЙ ФАЗЫ НА ЗЕМЛЮ В ШАХТНОЙ УЧАСТКОВОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ. МЕТОД ОЦЕНКИ

Сергин Е.В.,

Институт прикладной математики и механики НАН Украины

Рассматривается система "шахтная электрическая сеть – аппарат защиты от токов утечки с устройством защитного шунтирования на землю поврежденной фазы". Предложен метод анализа реализуемости устройства защитного шунтирования, основанный на оценке определяемости поврежденной фазы сети на землю.

Considered is "mine electrical network - leakage current protection apparatus with damaged phase protective ground shunting device" system. Protective shunting device realizability analysis method based on damaged-on-ground network phase determinability proposed.

Область техники. Для защиты от токов утечки, в том числе защиты людей от поражения электротоком, в шахтных участковых электрических сетях напряжением 1140 В применяют аппараты защитного отключения сети со снижением токов утечки посредством защитного шунтирования поврежденной фазы на землю (в дальнейшем, аппараты защиты) [1].

Повышенная пропускная способность сетей напряжением 1140 В создает экономически выгодные предпосылки к использованию в них протяженных участков, обладающих повышенной емкостью изоляции фаз относительно земли. Уже в ходе промышленных испытаний электрооборудования на напряжение 1140 В расчетная суммарная емкость кабелей в одной из схем электроснабжения составила 1,79 мкФ на фазу [2]. Защитное шунтирование эффективно действует при практически любой емкости изоляции. Тем не менее, к аппаратам защиты, предназначенным для работы в сетях напряжением 1140 В, предъявляется норма в отношении допустимого значения емкости изоляции – 1 мкФ на фазу [3], унаследованная из практики эксплуатации сетей меньшего напряжения. Применение такой нормы обусловлено, прежде всего, неспособностью существующих аппаратов защиты достоверно определять поврежденную фазу при слабых токах утечки на землю в условиях повышенной емкости изоляции.

Проблема. Современная тенденция к унификации электрооборудования на напряжение 660 и 1140 В расширяет область применения аппаратов с устройством защитного шунтирования. При этом перед разработчиками возникает задача создания новых устройств защитного шунтирования с повышенными чувствительностью к токам утечки и допустимой емкостью изоляции сети. Ведение разработки по прежней методологии [1] непродуктивно из-за ее ориентации на частный способ обработки сигналов в наперед заданной структуре системы "электрическая сеть – аппарат защиты". Разработчики, как и раньше, сталкиваются с проблемой выяснения потенциальных возможностей системы, ее рациональной структуры и параметров. В настоящей работе предлагается решать данные вопросы с помощью метода оценки определяемости поврежденной фазы на землю в исследуемой системе. Представляемый метод является обобщением подхода, изложенного в работе [4].

Понятие "определяемость". Нарушение равенства активных сопротивлений изоляции фаз сети относительно земли, в том числе, в результате повреждений изоляции, сопровождается появлением между нейтралью сети и землей промышленной составляющей напряжения нулевой последовательности $U_0(t)$. Данный признак используется непосредственно или косвенно (через наблюдения за напряжениями фаз сети относительно земли) во всех известных способах определения поврежденной фазы сети на землю [1, 5]. Его привлечение является обязательным, но по условиям электробезопасности не всегда достаточным.

Под определяемостью поврежденной фазы на землю в трехфазной электрической сети (сокращенно, определяемостью поврежденной фазы или просто определяемостью) будем понимать возможность безошибочного распознавания в сети номера поврежденной фазы по наблюдениям за напряжением $U_0(t)$. Фазу сети будем считать поврежденной, если ток утечки с нее на землю превышает пороговое значение, что указывает на необходимость искусственного снижения тока посредством защитного шунтирования. При соблюдении требований к быстрдействию защитного отключения электрической сети пороговое значение тока утечки не должно превышать кратковременной величины 0,1 А [3].

Будем также различать полную и частичную определяемость, если для ее установления соответственно не требуется и требуется

внешняя команда активизации, формируемая, например, по снижению активного сопротивления изоляции.

Существование определяемости поврежденной фазы является необходимым условием реализуемости устройства защитного шунтирования. Только после его выполнения имеет смысл анализировать остальные условия реализуемости – быстроедействия защитного шунтирования, устойчивости против ложных срабатываний и других.

Суть метода оценки. Результат оценки определяемости может принимать только булевы значения - "нет" или "есть". В настоящей работе представлен графоаналитический метод, в котором значение результата устанавливается визуально. Графические построения применены для придания наглядности методу и, главным образом, для облегчения целенаправленного подбора параметров исследуемой системы. Суть метода заключается в графическом представлении для каждой (одной) фазы сети множеств амплитудно-фазовых значений напряжения $U_0(t)$ для трех состояний шунтирования: ожидания, разрешения и запрета. Определяемость поврежденной фазы в системе оценивается путем сопоставления множеств между собой. Пересечение множества, отвечающего условиям разрешения шунтирования, с другими множествами указывает на отсутствие определяемости поврежденной фазы в исследуемой системе. Система обладает полной определяемостью, если нет пересечений, и частичной определяемостью, если нет пересечений только с множествами, соответствующими состоянию запрета шунтирования. При частичной определяемости поврежденной фазы игнорируется состояние ожидания шунтирования за счет блокировки защитного шунтирования до появления внешней команды активизации – сигнала защитного отключения. Существующие аппараты защиты образуют системы с частичной определяемостью поврежденной фазы.

Аналитические вычисления в данном методе сосредоточены в расчете границ множеств амплитудно-фазовых значений напряжения $U_0(t)$ по математической модели системы. Границы могут быть определены также экспериментально, что может потребоваться в случае нелинейной структуры аппарата защиты.

Математическая модель системы. На рисунке 1 представлен обобщенный вариант структурной модели системы "электрическая сеть – аппарат защиты" [4].

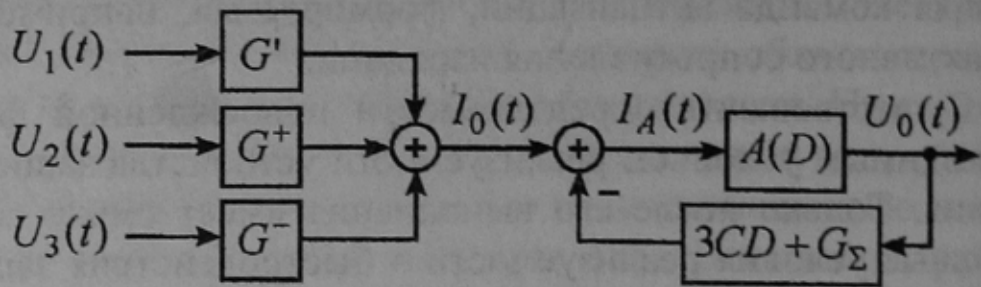


Рисунок 1 - Структурная модель системы

Отличительной особенностью модели является эквивалентное представление аппарата защиты пассивным двухполосником, включенным между нейтралью сети и землей, с передаточной функцией $A(D)$, $D = d/dt$ от тока $I_A(t)$, протекающего через аппарат защиты, к напряжению $U_0(t)$. Данное представление получено из условия симметричного подключения аппарата защиты к сети. При составлении модели использованы также общепринятые допущения [1, 5] о действии в сети фазных питающих напряжений

$$U_i(t) = U_m \sin[\omega t + (1-i)2\pi/3], \quad i = 1, 2, 3 \quad (1)$$

на промышленной частоте ω с одинаковой амплитудой U_m , а также симметрии емкостей C фаз кабельной сети относительно земли. Однофазное повреждение изоляции представлено утечкой с активной проводимостью G' . В состоянии ожидания шунтирования (до появления утечки G' в фазе под первым номером) в опережающей и отстающей фазах сети по отношению к повреждаемой присутствуют длительно допустимые несимметричные утечки с активной проводимостью G^+ и G^- соответственно. Симметричные активные проводимости G изоляции фаз сети относительно земли вместе с выше названными проводимостями образуют суммарную активную проводимость

$$G_\Sigma = 3G + G' + G^+ + G^-, \quad (2)$$

которая вместе с суммарной емкостью $3C$ изоляции фаз образуют передаточную функцию

$$3CD + G_\Sigma, \quad D = d/dt \quad (3)$$

другого пассивного двухполосника, включенного параллельно первому и эквивалентно представляющего собой суммарные параметры изоляции сети. Входным сигналом системы является недоступный измерению ток

$$I_0(t) = G'U_1(t) + G^-U_2(t) + G^+U_3(t), \quad (4)$$

который с учетом (1) представим в виде

$$I_0(t) = I_{0m} \sin(\omega t + \alpha),$$

$$I_{0m} = 0,5U_m \sqrt{q^2 + p^2}, \quad \alpha = \arctan p/q + \pi(1 - \text{sgn } q)/2, \quad (5)$$

$$q = 2G' - G^+ - G^-, \quad p = \sqrt{3}(G^+ - G^-).$$

Передающая функция системы $I_0 \rightarrow U_0$ равна

$$W_0(D) = A(D)/[1 + A(D)(3CD + G_\Sigma)], \quad d/dt. \quad (6)$$

Данное выражение основано на линейности передаточной функции $A(D)$, свойственной всем известным аппаратам защиты.

Математическая модель (5), (6) системы является общей, охватывающей как установившиеся, так и переходные процессы относительно земли. Поврежденную же фазу распознают по установившимся колебаниям. Для них реакция системы с передаточной функцией (6) на входной сигнал (5) имеет вид

$$U_0(t) = U_{0m} \sin(\omega t + \varphi_0), \quad U_{0m} = I_{0m} |W_0(j\omega)|, \quad (7)$$

$$\varphi_0 = \alpha - \arctan[\text{Im } W_0(j\omega)/\text{Re } W_0(j\omega)] + \pi[1 - \text{sgn } \text{Re } W_0(j\omega)]/2.$$

Выражений (1), (2), (5)-(7) при известной передаточной функции $A(j\omega)$ достаточно для определения любых сигналов в системе.

При графических построениях анализируется величина тока через утечку G' . Его амплитуда равна $I'_m(t) = \max\{|U_1(t) - U_0(t)|G'\}$, где разность $U_1(t) - U_0(t)$ является напряжением поврежденной фазы сети относительно земли, амплитуда которого с учетом (1) и (7) может быть найдена по теореме косинусов. В результате получаем

$$I'_m = G' \sqrt{U_m^2 + U_{0m}^2 - 2U_m U_{0m} \cos \varphi_0}. \quad (8)$$

Образование и свойства множеств. Рассмотрим напряжения (1) и (7) соответственно как векторы $\bar{U}_i, i = 1, 2, 3$ и \bar{U}_0 с началом в нейтральной точке сети, которую примем за начало полярных координат. Пара амплитудно-фазовых значений (7) напряжения $U_0(t)$ при фиксированных параметрах изоляции сети является координатами точки конца вектора \bar{U}_0 (потенциала земли) – простейшего элемента, достаточного для изображения сигнала. Изменения параметров изоляции сети приводят к изменениям координат точек представления наблюдаемого сигнала, отдельные совокупности которых образуют множества. Изменения двух и более параметров изоляции придают множествам вид областей. При установлении границ множеств из

всех параметров изоляции C , G' , G , G^+ и G^- непосредственно варьируются параметры C и G' , а остальные - через условие $G + G^+ + G^- = G_\lambda$, где $G_\lambda = const$ - активная проводимость, соответствующая порогу срабатывания устройства контроля изоляции сети в составе аппарата защиты (порогу появления сигнала защитного отключения сети). Искомые области занимают наибольшую площадь при $G = 0$. До повреждения изоляции ее начальная проводимость сосредоточена в утечках G^+ и G^- . Вводя коэффициент распределения $k = G^-/G^+$ получаем набор начальных проводимостей для расчета координат элементов (точек) множеств:

$$G = 0, G^+ = (1+k)^{-1}G_\lambda, G^- = k(1+k)^{-1}G_\lambda, k \in [0, 1]. \quad (9)$$

Каждое множество определяется свойством, общим для всех элементов множества. В таблице 1 представлены условные обозначения множеств и их свойства в зависимости от состояния шунтирования.

Таблица 1

Состояние шунтирования	Множество	Свойство множества
Ожидание	S_0	$G' = 0$
Разрешение	$S_i, i = 1, 2, 3$	$I'_m \geq 0,1\sqrt{2}$
Запрет для соседних фаз	$S_{0i}, i = 1, 2, 3$	$G' \geq 0,1\sqrt{2}/\sqrt{3}U_m$

Свойства множеств характеризуют: для S_0 - отсутствие в сети повреждения изоляции; для $S_i, i = 1, 2, 3$ - действующее значение тока утечки в поврежденной i -й фазе сети, подлежащего искусственному снижению; для $S_{0i}, i = 1, 2, 3$ - значения проводимости утечки в i -й фазе сети, при которых ошибочное шунтирование любой из соседних фаз сети будет приводить к превышению действующим значением тока утечки допустимой кратковременной величины 0,1 А [3]. В оценке определяемости участвуют два множества запрета шунтирования - от опережающей и отстающей фаз сети по отношению к анализируемой. Множества S_i и отдельно $S_{0i}, i = 1, 2, 3$ различаются между собой только относительным фазовым сдвигом на 120° . Учитывая трехфазную симметрию множеств оценку определяемости можно выполнять по отношению к одной из трех фаз сети. Так, фазе сети с первым номером соответствует два условия частичной опреде-

ляемости $S_1 \cap S_{02} = \emptyset$, $S_1 \cap S_{03} = \emptyset$ и дополнительно к ним условие $S_1 \cap S_0 = \emptyset$ при полной определяемости.

Границы множеств S_0 , S_1 и S_{01} (и, как следствие, S_{02} и S_{03}) рассчитываются по выражениям (1), (2), (5)-(9). Причем для множества S_0 окончательный вид (максимальных размеров) получается путем объединения его с собственными двумя копиями, смещенными на углы $\pm 120^\circ$. В расчетах удобно использовать передаточную функцию $A(j\omega)$ двухполюсника аппарата защиты с обобщенной схемой замещения, представленной на рисунке 2. Выражение для передаточной функции не приводится в силу простоты его получения.

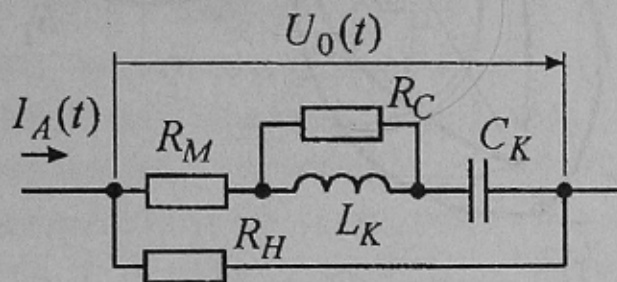
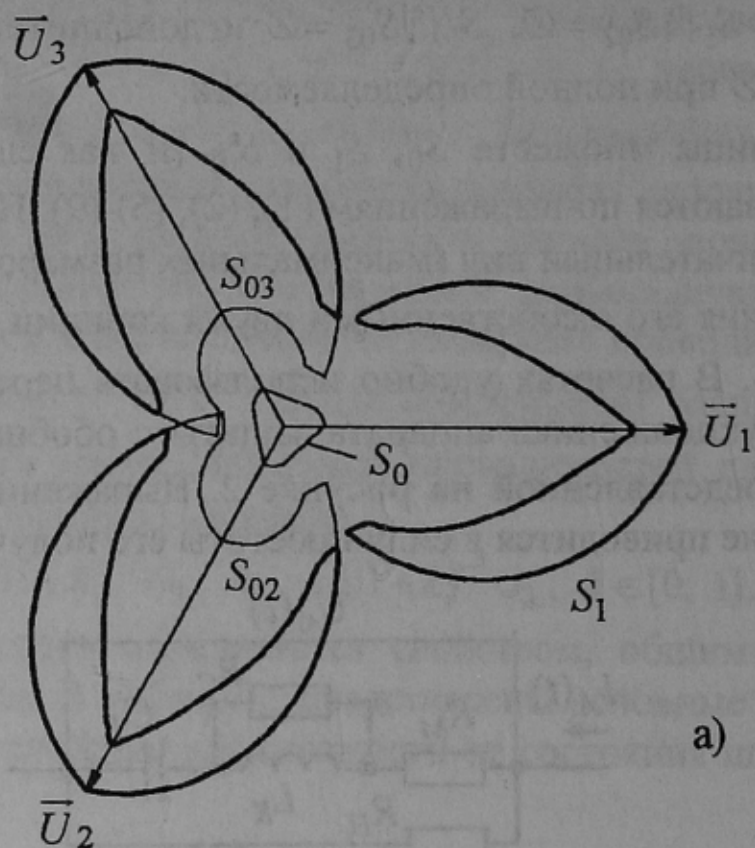


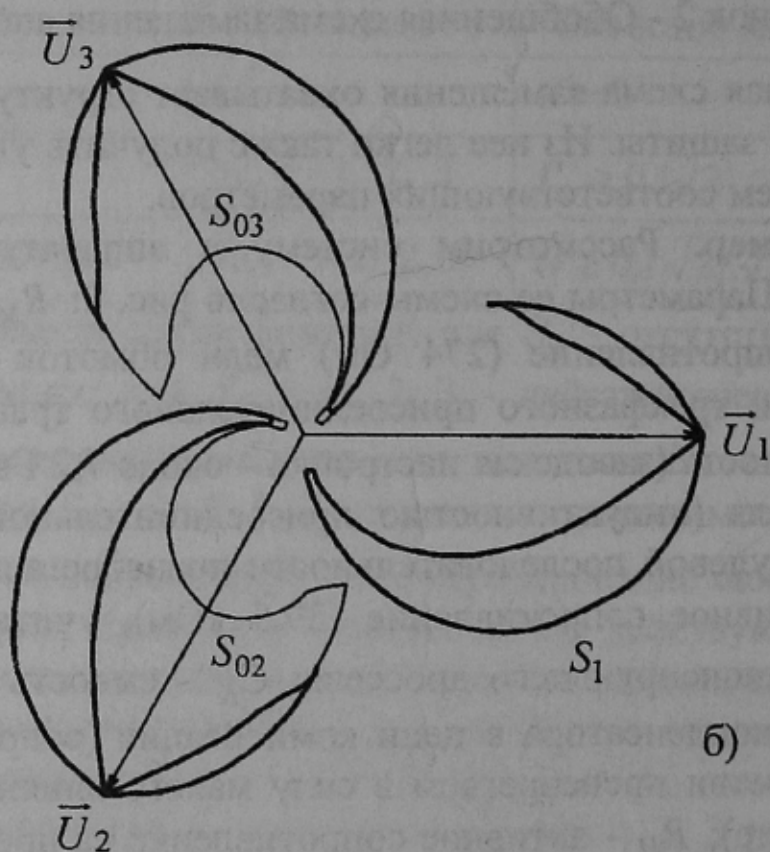
Рисунок 2 - Обобщенная схема замещения аппарата защиты

Данная схема замещения охватывает структуры существующих аппаратов защиты. Из нее легко также получить упрощенные варианты заданием соответствующих параметров.

Пример. Рассмотрим систему с аппаратурой защиты типа РУ-1140. Параметры ее схемы согласно рис. 2: R_M - суммарное омическое сопротивление (274 Ом) меди обмоток компенсирующего дросселя и трехфазного присоединительного трансформатора; L_K - индуктивность (заводская настройка – около 7,2 Гн) компенсирующего дросселя (индуктивностью присоединительного трансформатора по току нулевой последовательности пренебрегаем в силу малости); R_C - активное сопротивление (39,5 кОм), учитывающее потери в стали компенсирующего дросселя; C_K - емкость (10 мкФ) разделительного конденсатора в цепи компенсации (сопротивлением параллельной ветви пренебрегаем в силу малого влияния на промышленной частоте); R_H - активное сопротивление на промышленной частоте, приносимое устройством контроля сопротивления изоляции сети. Множества, рассчитанные по данным параметрам при емкости $C = 0,1-1$ мкФ на фазу и сопротивлении срабатывания устройства контроля изоляции $G_\lambda^{-1} = 60$ кОм, представлены на рисунке 3а.



а)



б)

Рисунок 3 - Множества сигналов в системе с аппаратурой защиты РУ-1140 при заводских (а) и новых (б) параметрах

Отсутствие пересечений множества S_1 с другими указывает на

существование полной определяемости поврежденной фазы при емкости $C \leq 1$ мкФ на фазу. На практике же чувствительность к токам утечки в такой системе заглублена в силу особенностей примененного способа обработки сигналов [1]. С увеличением емкости изоляции сети возникает пересечение множеств S_1 и S_{02} и, как следствие, потеря определяемости. Для ее восстановления требуется видоизменение (сжатие) множеств. Простым приемом, в этом плане, является сокращение числа элементов множеств с аргументом $\varphi_0 > 0$. Для этого достаточно сдвинуть резонансную настройку компенсирующего дросселя в сторону меньших значений емкости изоляции сети. С этой целью в аппаратуре РУ-1140 может быть использована свободная обмотка дросселя с индуктивностью $L_K = 11,5$ Гн. Дополнительные возможности предоставляет также изменение условия формирования команды активизации шунтирования, например, при сопротивлении изоляции сети ниже 8 кОм – вероятном пороге появления токов утечки, подлежащих искусственному снижению. В этом случае границы множеств S_{0i} , $i = 1, 2, 3$ приближаются к границам подмножеств S_j , $j = i$, выделенных на рис. 3 жирной линией. Результат применения названных приемов при емкости изоляции $C = 0,1 - 2$ мкФ на фазу показан на рисунке 3б без множества S_0 , не влияющего на оценку частичной определяемости поврежденной фазы. Упомянутые приемы не являются единственно возможными [4]. Демонстрация прочих приемов достижения рациональных параметров системы с помощью представленного метода выходит за рамки настоящей работы.

Вывод. Предложенные понятие и метод оценки определяемости поврежденной фазы позволяют анализировать потенциальные возможности системы "электрическая сеть – аппарат защиты" и осуществлять целенаправленный подбор ее параметров.

Список источников.

1. Дзюбан В.С. Аппараты защиты от токов утечки в шахтных электрических сетях. М.: Недра, 1982. 152 с.
2. Взрывобезопасное электрооборудование на 1140 В для угольных шахт/Под ред. Е.С.Траубе – М.: Недра, 1982. 264 с.
3. Аппараты защиты от токов утечки рудничные для сетей напряжением до 1200 В. Общие технические условия. ГОСТ 22929-78.
4. Сергин Е.В. Распознавание поврежденной фазы на землю в шахтных трехфазных сетях напряжением 380-1140 В по реакции на промышленной частоте//Вестник Харьковского государственного политехнического университета. Сб. науч. тр. Вып. 71. – Харьков: ХГПУ, 1999. – С.115-120.
5. Ягудаев Б.М., Шишкин Н.Ф., Назаров В.В. Защита от электропоражения в горной промышленности. – М.: Недра, 1982. 152 с.