

## ПРАВИЛЬНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕННОЙ ФАЗЫ НА ЗЕМЛЮ ШАХТНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ. МЕТОД ОЦЕНКИ

Сергин Е.В.

Институт прикладной математики и механики НАН Украины, г. Донецк

E-mail: [math@iamm.ac.donetsk.ua](mailto:math@iamm.ac.donetsk.ua)

### Abstract

*Sergin Y.V. The estimation method of damaged-on-ground phase determination correctness in mine electrical network. Mine electrical network leakage current protective damping device realizability analysis method is represented. Method is based on estimation of damaged-on-ground phase determination correctness.*

**Постановка проблемы.** Способы эффективного защитного снижения токов утечки на землю в шахтной электрической сети опираются на знание номера поврежденной фазы (линии) [1, 2]. Такие способы реализуемы при наличии условий правильности определения поврежденной фазы. Ошибки недопустимы из-за тяжести последствий. Так, в случае применения защитного шунтирования фазы на землю ошибка определения ее номера сопровождается ростом напряжения поврежденной фазы относительно земли до величины линейного напряжения сети и, как следствие, ростом тока утечки, например, через человека, до максимальной величины вместо снижения к безопасной величине 25 мА (согласно требованиям ГОСТ 22929-78).

**Анализ исследований и публикаций.** Известные технические решения для определения поврежденной фазы электрической сети, классифицированные в работах [1, 2], являются продуктами эвристического подхода, при котором на основе интуиции, опыта, экономических и прочих соображений сначала предлагается алгоритм обработки сигналов, а затем анализируется получаемая в результате чувствительность к токам утечки. Так, анализ [1] позволяет для используемого на практике технического решения найти условия правильного определения поврежденной фазы и констатировать недостаточный уровень достигнутой чувствительности. Эвристический подход не дает ответа на правомерный вопрос разработчика, почему так, а не иначе. В работе [3] предложен математически формализованный подход, при котором сначала обеспечивают необходимые условия правильного определения поврежденной фазы с соблюдением требований электробезопасности и лишь затем приступают к поиску достаточных условий решения задачи - выбору алгоритма обработки сигналов и параметров реализуемого устройства. Данный подход основан на представлении обрабатываемых сигналов элементами множеств, отвечающих номерам фаз (линий) электрической сети и непересекающихся между собой. Последнее является необходимым условием правильного определения поврежденной фазы. Конечное же техническое решение является материальным воплощением достаточных условий.

**Цель работы** – представить на базе упомянутого математического формализма метод оценки существования достаточных условий правильного определения поврежденной фазы на землю шахтной электрической сети.

**Математическая модель.** Рассматривается система "шахтная электрическая сеть – аппарат защиты от токов утечки на землю". В аппарате защиты во внимание принимаются параметры элементов цепи протекания тока нулевой последовательности электрической сети

с фаз на землю. Для большинства систем может быть задано обыкновенное линейное дифференциальное уравнение с постоянными коэффициентами

$$N(D)U_0(t) = M(D)I_0(t), \quad D \equiv d/dt. \quad (1)$$

Здесь  $N(D)$  и  $M(D)$  - полиномы степеней соответственно  $n$  и  $m$ ,  $m \leq n$ ;  $I_0(t)$  - недоступный прямому измерению входной сигнал системы (рассмотрен ниже);  $U_0(t)$  - наблюдаемый выходной сигнал системы - напряжение смещение нейтрали относительно земли, которое непосредственно в обработке сигналов может не использоваться, но имеет определяющее значение для получения любых других доступных наблюдению сигналов системы, например, часто используемых в [1, 2] напряжений фаз электрической сети относительно земли.

В определении поврежденной фазы электрической сети ориентируются на установившиеся колебания. При симметрии параметров изоляции шахтной кабельной электрической сети и отсутствии составляющей нулевой последовательности в питающих напряжениях входной сигнал системы возбуждается несимметрией утечек фаз относительно земли и имеет вид периодического воздействия на промышленной частоте  $\omega$  [3]:

$$\begin{aligned} I_0(t) &= I_{0m} \sin(\omega t + \alpha), \\ I_{0m} &= 0,5U_m \sqrt{q^2 + p^2}, \quad \alpha = \arctan p/q + \pi(1 - \operatorname{sgn} q)/2, \\ q &= 2G' - G^+ - G^-, \quad p = \sqrt{3}(G^+ - G^-), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $G'$  и  $G^+$ ,  $G^-$  - активные проводимости утечек соответственно повреждающей и начальных (перед повреждением) в опережающей и отстающей фазах электрической сети;  $U_m$  - амплитуда фазного питающего напряжения;  $\alpha$  - фазовый сдвиг входного сигнала  $I_0(t)$  относительно питающего напряжения поврежденной фазы. По физическому смыслу входной сигнал соответствует току через глухозаземленную нейтраль электрической сети.

Для уравнения (1) с вещественными коэффициентами при действии гармонической функции (2) на входе, если только  $N(j\omega) \neq 0$ ,  $j = \sqrt{-1}$ , существует единственное решение

$$\begin{aligned} U_0(t) &= U_{0m} \sin(\omega t + \alpha + \varphi_0), \quad U_{0m} = I_{0m} |W_0(j\omega)|, \\ \varphi_0 &= \arctan[\operatorname{Im} W_0(j\omega) / \operatorname{Re} W_0(j\omega)] + \pi[1 - \operatorname{sgn} \operatorname{Re} W_0(j\omega)]/2, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $W_0(j\omega) = M(j\omega) / N(j\omega)$  - передаточная функция системы  $I_0 \rightarrow U_0$ , по физическому смыслу соответствующая комплексу полного сопротивления нейтрали электрической сети относительно земли и существенно зависящая от структуры аппарата защиты [3]. В этой связи ограничимся качественной характеристикой установившегося решения (3), традиционно представив его в комплексной плоскости при  $\omega t = 0$  вектором

$$\vec{U}_0 = U_{0m} e^{j(\alpha + \varphi_0)}. \quad (4)$$

Начало координат соответствует потенциалу нейтрали электрической сети. По отношению к ней действуют три вектора фазных питающих напряжений

$$\vec{U}_i = U_m e^{j(1-i)2\pi/3}, \quad i = 1, 2, 3. \quad (5)$$

При вращении векторов (5) вокруг начала координат их концы описывали бы окружность радиусом  $U_m$ , ограничивающую совокупность допустимых наблюдений вектора (4), поскольку для всех нерезонансных и распространенных низкодобротных резонансных систем свойственно  $U_{0m} \leq U_m$ . Результат наблюдения вектора (4) относительно первой фазы электрической сети ( $i = 1$ ) представляет собой образ (точку) с координатами конца вектора - амплитудой  $U_{0m}$  и начальной фазой  $\alpha + \varphi_0$  реального сигнала (3). Данный образ соответствует потенциалу земли. Вся совокупность допустимых образов образуют собой основное множество (универсум)  $M^U$ , в котором для каждой фазы электрической сети различаются подмно-



жества: разрешения  $S$ , запрета  $E^+$ ,  $E^-$  и ожидания  $S_0$  применения операции защитного снижения величины тока утечки [3]. Знаки "+" и "-" указывают на условия образования подмножеств в случае возникновения опасной утечки соответственно в опережающей и отстающей фазах электрической сети по отношению к рассматриваемой. Подмножество ожидания  $S_0$  является общим для всех рассмотрений. Отсутствие пересечений подмножества разрешения  $S$  с другими означает наличие в системе определяемости поврежденной фазы [3]. Каждое подмножество является, в свою очередь, объединением частных подмножеств по числу входящих в передаточную функцию  $W_0(j\omega)$  параметров системы при условии

$$G^+ + G^- = G_\lambda, \quad (6)$$

где  $G_\lambda = const$  - порог срабатывания устройства контроля увеличения проводимости изоляции электрической сети. Условие (6) свойственно работе всех аппаратов защиты. Каждое частное подмножество образуется в результате изменения параметра системы в возможных пределах и начальных проводимостей. Последние, введя в (6) коэффициент распределения  $k = G^- / G^+$ , удобно представить в виде

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

На вид подмножеств существенное влияние оказывает девиация начальной фазы  $\alpha$  входного воздействия (2) – чем она больше (при увеличении чувствительности к повреждающей утечке -  $G' \rightarrow G_\lambda$ ,  $G' > G_\lambda$ ), тем "шире" подмножества. Далее будем исходить из существования в системе необходимого условия для правильного определения поврежденной фазы – наличия определяемости.

**Суть метода.** Задача правильного определения поврежденной фазы в рамках представленного формализма сводится к установлению принадлежности наблюдаемого образа напряжения  $U_0(t)$  одному из множеств  $S_i$ , отвечающих номерам  $i = 1, 2, 3$  фаз электрической сети. Для того чтобы справиться с такой задачей, необходимо для каждой фазы электрической сети иметь правило отделения образов множества разрешения  $S$  от образов множеств запрета  $E^+$ ,  $E^-$  и ожидания  $S_0$ . В методах распознавания образов подобную операцию выполняют с помощью разделяющих (решающих) функций [4]. Применительно к рассматриваемой задаче разделяющая функция должна для каждой фазы электрической сети разбивать универсум  $M^U$  на два подмножества-класса  $K^S$  и  $K^E$  с расчетом "поглощения" множества  $S$  классом  $K^S$  и остальных множеств классом  $K^E$ :

$$M^U = K^S \cup K^E, \quad K^E = \overline{K^S}, \quad S \cup K^E = \emptyset, \quad E^+ \cup E^- \cup S_0 \cup K^S = \emptyset. \quad (7)$$

В результате, решение задачи определения поврежденной фазы сводится к классификации наблюдаемого образа по знаку разделяющих функций на принадлежность к одному из классов  $K_i^S$ , где  $i = 1, 2, 3$  - номер фазы электрической сети. Вследствие классификации возможно принятие "лишних" (но приемлемых) решений поскольку выделение в универсуме  $M^U$  классов вида  $K_i^S \equiv S_i$ ,  $i = 1, 2, 3$ , связано со сложностью реализации разделяющих функций. При простых разделяющих функциях возможны пересечения

$$K_1^S \cup K_2^S \cup K_3^S \neq \emptyset. \quad (8)$$

В случае принадлежности наблюдаемого образа таким пересечениям решение должно блокироваться для исключения неоднозначности результата. Пересечения же (8) считаются допустимыми, если их элементы не принадлежат одновременно любому из множеств  $S_i$ ,  $i = 1, 2, 3$ :

$$S_i \cup K_i^S \cup K_j^S = \emptyset, \quad i, j = 1, 2, 3, \quad i \neq j. \quad (9)$$

Таким образом, для правильного определения поврежденной фазы достаточно выполнения условий (7) и (9).

Разделяющие функции отражают алгоритм определения поврежденной фазы. К их построению сводятся все известные технические решения. Представленный же метод позволяет оценить их пригодность в наглядной форме.

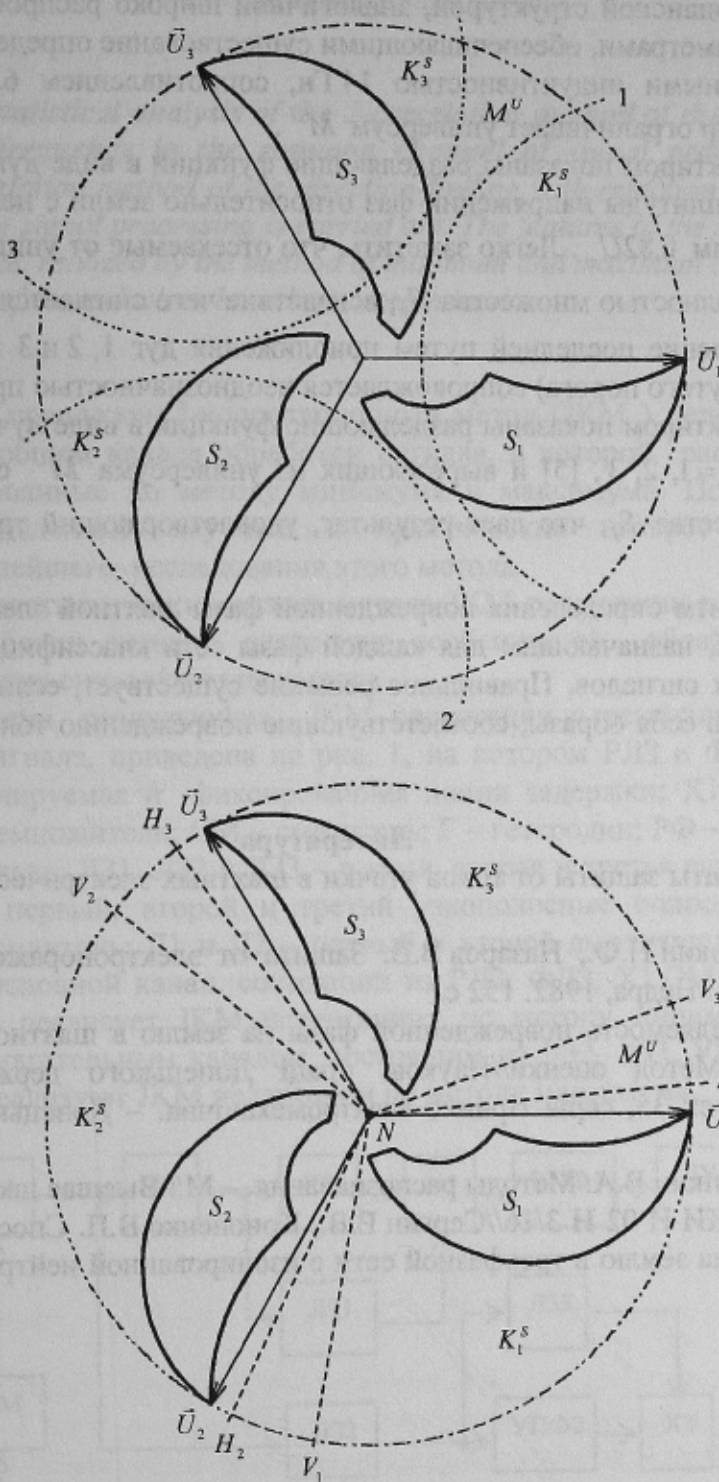


Рисунок 1. Иллюстрация метода

В качестве примера на рисунке 1 представлены сопоставляемые множества для системы, обладающей определяемостью поврежденной фазы ( $S_1 \cup S_2 \cup S_3 = \emptyset$ ) при защитной



минимизации токов утечки посредством автокомпенсации емкостной составляющей с замкнутым управлением относительно поврежденной фазы (которой характерны тождества  $E_1^- \equiv S_2$ ,  $E_1^+ \equiv S_3$ ). Рассматривается вариант без множеств ожидания  $S_0$  при пуске алгоритма определения поврежденной фазы по внешнему сигналу [3].

Множества соответствуют шахтной электрической сети с емкостью изоляции до 1,25 мкФ на фазу при  $U_m = \sqrt{2} * 1,1 * 380$  В,  $1/(G^+ + G^-) = 18$  кОм,  $1/G' \geq 6$  кОм, а также аппарату защиты с резонансной структурой, аналогичной широко распространенным аппаратам АЗУР.1, но с параметрами, обеспечивающими существование определяемости – с последовательно соединенными индуктивностью 14 Гн, сопротивлением 6,3 кОм и емкостью 9 мкФ. Штрих-пунктир ограничивает универсум  $M^U$ .

На рис. 1а пунктиром показаны разделяющие функции в виде дуг 1, 2 и 3 [1], как результат сравнения амплитуды напряжений фаз относительно земли с некоторым порогом, в нашем примере равным  $0,82U_m$ . Легко заметить, что отсекаемые от универсума  $M^U$  классы  $K_i^S$  не охватывают полностью множества  $S_i$ , вследствие чего снижается чувствительность к токам утечки. Повышение последней путем приближения дуг 1, 2 и 3 к началу координат (увеличением упомянутого порога) сопровождается неоднозначностью принятия решения.

На рис. 1б пунктиром показаны разделяющие функции в виде лучей, образующих углы  $\angle H_i N V_i \leq 2\pi/3$ ,  $i = 1, 2, 3$ , [5] и вырезающих из универсума  $M^U$  сектора-классы  $K_i^S$ , охватывающие множества  $S_i$ , что дает результат, удовлетворяющий требованиям электробезопасности.

**Вывод.** Алгоритм определения поврежденной фазы шахтной электрической сети эквивалентен функциям, назначающим для каждой фазы сети классифицируемое множество образов наблюдаемых сигналов. Правильное решение существует, если классифицируемое множество включает в себя образы, соответствующие повреждению только в рассматриваемой фазе.

### Литература

1. Дзюбан В.С. Аппараты защиты от токов утечки в шахтных электрических сетях. - М.: Недра, 1982. 152 с.
2. Ягудаев Б.М., Шишкин Н.Ф., Назаров В.В. Защита от электропоражения в горной промышленности. - М.: Недра, 1982. 152 с.
3. Сергин Е.В. Определяемость поврежденной фазы на землю в шахтной участковой электрической сети. Метод оценки//Наукові праці Донецького державного технічного університету. Випуск 35, серія гірничо-електромеханічна. - Донецьк: ДонДТУ, 2001. - С. 159-167.
4. Горелик А.Л., Скрипкин В.А. Методы распознавания. - М.: Высшая школа, 1984. 208 с.
5. RU 2150167 С1, МКИ Н 02 Н 3/16//Сергин Е.В., Кононенко В.П. Способ определения поврежденной фазы на землю в трехфазной сети с изолированной нейтралью. - Б. И. № 15, 2000.