

Е.В. Черноус

УЧЕТ НЕСИММЕТРИИ В АЛГОРИТМЕ ПОИСКА ПОВРЕЖДЕННОЙ ФАЗЫ СЕТИ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

*Алгоритм идентификации поврежденной фазы шахтной низко-
вольтной сети с изолированной нейтралью по двум мгновенным значениям
потенциала нейтрали.*

Постановка проблемы. При возникновении однофазной утечки в участковой шахтной сети напряжением до 1200 В с изолированной нейтралью должно следовать немедленное защитное отключение по следующим причинам. Во-первых, утечка может быть связана с попаданием человека под фазное напряжение, во-вторых, она может стать предпосылкой к более серьезной аварийной ситуации, связанной, например, с двухфазным замыканием на разнесенные в пространстве точки сети заземления [1]. Существующая тенденция к повышению требований по защите человека [2], сводящаяся, в частности, к снижению допустимого значения напряжения касания, требует поиска новых технических решений по охране труда. Одним из таких решений является защитное шунтирование поврежденной фазы, заключающееся в ее автоматическом соединении с заземляющим устройством [3]. Это требует надежной работы устройства выбора поврежденной фазы (УВФ) при достаточно высоком его быстродействии.

Анализ публикаций и исследований. В [4] нами предложен быстродействующий алгоритм идентификации поврежденной фазы, основанный на определении аргумента потенциала нейтрали по двум мгновенным значениям $u_N(t_1)$ и $u_N(t_2)$, снятым для двух смежных значений аргумента ωt_1 и ωt_2 , разница между которыми $\Delta\omega t$ фиксирована и находится в пределах от 10 до 15 градусов. В качестве опорного напряжения, задающего отсчет времени (или угла), удобно принять одно из линейных напряжений, например, u_{AB} .

Требования к надежности УВФ достаточно жесткие, так как ошибочное определение поврежденной фазы недопустимо. Однако в условиях реальной сети существуют факторы, которые могут исказить работу УВФ. Это, прежде всего, различные виды несимметрии, погрешности измерений, высшие гармоники или динамические составляющие. Для количественной оценки работоспособности (устойчивости) предложенного алгоритма был введен коэффициент погрешности k_n , определяемый выражением:

$$k_n = \frac{u_N(t_2)}{u_N(t_1)} \cdot \frac{u_{\text{нф}}(t_1)}{u_{\text{нф}}(t_2)}, \quad (1)$$

где $u_N(t_1)$, $u_N(t_2)$ – входные величины (мгновенные значения потенциала нейтрали) при отсутствии искажающих факторов;

$u_{N\Phi}(t_1)$, $u_{N\Phi}(t_2)$ – те же входные величины, измеренные в реальной сети при действии искажающих факторов.

Проведенные нами исследования [4] показали, что предложенный алгоритм работает устойчиво, с достаточным запасом при условии, если

$$0,85 < k_n < 1,15.$$

Это значит, что вне зависимости от физической природы искажающих факторов алгоритм допускает отклонение отношения $u_{N\Phi}(t_1)/u_{N\Phi}(t_2)$ на 15 % в ту или другую сторону от его истинного значения (допустимое граничное значение отклонения, когда запас устойчивости практически исчерпан, составляет ≈ 22 %). Кроме того, чтобы избежать недопустимых погрешностей измерения в зонах перехода потенциала нейтрали через нуль, алгоритмом предусмотрено добавочное ограничение:

$$0,1 < u_{N\Phi}(t_1)/u_{N\Phi}(t_2) < 10. \quad (2)$$

Измеренные значения входных величин, не отвечающие ограничению (2), алгоритмом отбрасываются и идентификация по ним не производится.

Цель статьи. Определение границ устойчивой работы предложенного алгоритма в условиях различных видов несимметрии (продольной, поперечной, а также несимметрии источника питания), которые могут возникнуть в условиях реальной сети.

Результаты исследований. Упрощенная схема замещения шахтной участковой сети (рисунок 1) содержит: сопротивление изоляции и емкость фаз кабелей по отношению к земле R , C ; эквивалентные параметры трехфазного источника питания e , r_0 , L_0 ; эквивалентные параметры потребителей участка $r_{\text{п}}$, $L_{\text{п}}$; сопротивление утечки (в частности, сопротивление тела человека) $R_{\text{н}}$. При ее анализе в установившемся режиме однофазной утечки не учитываются продольное сопротивление кабелей (активное сопротивление и индуктивность), межвитковые емкости машин и трансформаторов, а также волновые процессы в кабельных коммуникациях.

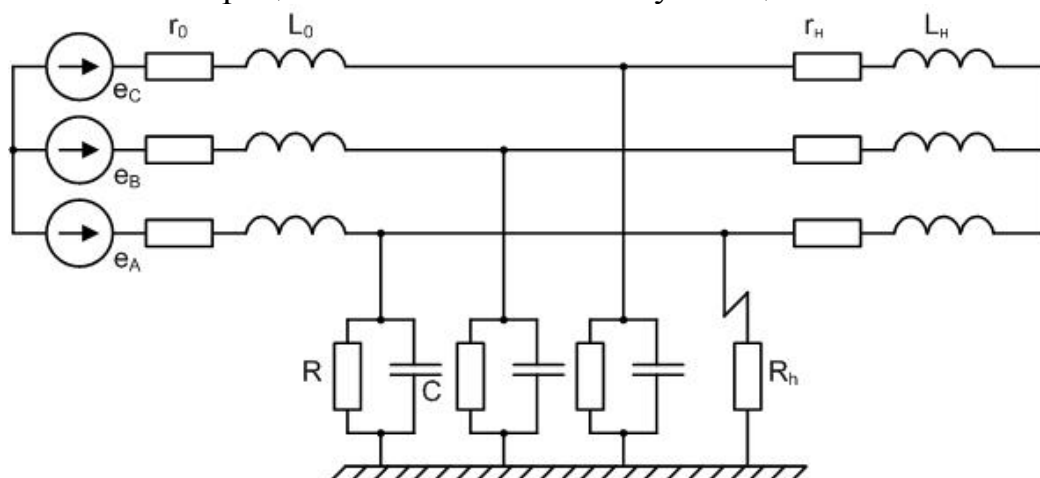


Рисунок 1 – Схема замещения участковой шахтной сети

Методика исследования заключается в определении погрешности, вносимой различными видами несимметрии, количественной характеристикой которой является коэффициент k_n по (1), зависящий от уровня несимметрии, момента снятия отсчета входных величин и фазы, в которой возникла утечка. Порядок выполнения одного численного эксперимента следующий:

а) исследуется симметричный режим сети (рисунок 1), при котором определяются истинные значения величин $u_N(t_1)$, $u_N(t_2)$, используемые далее как эталонные;

б) исследуется несимметричный режим той же сети, при котором определяются фактические значения величин $u_{N\Phi}(t_1)$, $u_{N\Phi}(t_2)$ с учетом погрешностей, вносимых исследуемым видом несимметрии;

в) в соответствии с (1) определяется коэффициент погрешности k_n . Данные опыты повторяются для различных моментов времени, для утечки в различных фазах, а также для различных параметров несимметрии.

Продольная несимметрия, как правило, обусловлена несимметрией эквивалентных сопротивлений нагрузки (обрыв фазы или линейного провода являются особыми случаями и здесь не рассматриваются). В качестве параметра, характеризующего уровень этого вида несимметрии, принят коэффициент несимметрии $k_{нс}$, следующим образом определяющий комплексы сопротивлений нагрузки Z_A , Z_B , Z_C в фазах сети:

$$Z_A = r_n + j\omega L_n; \quad Z_B = Z_A \cdot k_{нс}; \quad Z_C = Z_A / k_{нс}.$$

Поперечная несимметрия обусловлена разбросом эквивалентных проводимостей «фаза-земля» из-за различия, как правило, значений сопротивления изоляции фаз (в большей мере) и значений емкости «фаза-земля» (в меньшей мере). Параметр $k_{нс}$, характеризующий уровень несимметрии, вводится следующим образом:

$$Y_A = 1/R + j\omega C; \quad Y_B = Y_A \cdot k_{нс}; \quad Y_C = Y_A / k_{нс},$$

где Y_A , Y_B , Y_C – комплексы эквивалентных проводимостей «фаза-земля».

Несимметрия источника, как правило, обусловлена наличием электродвижущей силы (ЭДС) обратной последовательности, характеризуемой коэффициентом $k_{он} = E_2/E_1$. Однако искажения, вносимые в работу УВФ этим видом несимметрии, могут зависеть не только от значения E_2 , но и от ее фазы ψ_2 (по отношению к фазе ЭДС прямой последовательности E_1). Это значит, что для характеристики этого вида несимметрии необходимо два параметра: коэффициент обратной последовательности $k_{он}$ и коэффициент фазы ψ_2 .

Таким образом, выполняемое исследование, по своей сути, сводится к анализу зависимости $k_n = f(t_1, k_{нс})$ для продольной и поперечной несимметрии и зависимости $k_n = f(t_1, k_{он}, \psi_2)$ для несимметрии источника.

На рисунке 2 приведены зависимости коэффициента погрешности k_n в функции первого отсчета ωt_1 при продольной несимметрии и утечке в фазе В. Кривые приведены для $k_{нс} = 0,3$ (пунктирная линия) и $k_{нс} = 1,7$. Это значит, что разброс параметров по фазам нагрузки составляет 70 % (в обе стороны). Как интерпретировать полученные результаты? Во-первых, на большей части периода (около 290°) вносимая погрешность находится в допустимых пределах (около 15 %). Во-вторых, имеются две области, расположенные в окрестностях точек перехода потенциала нейтрали через нуль, с суммарной длительностью около 70° , в которых коэффициент k_n выходит за допустимые пределы и даже стремится к бесконечности. Поскольку эти области при проверке ограничения (2) из процесса идентификации исключаются, то можно утверждать, что продольная несимметрия не оказывает существенного влияния на работу алгоритма УВФ. Правда, при исключении измеренных данных, полученных в неблагоприятной области, возрастает продолжительность процесса идентификации, однако это добавочное увеличение в данной серии опытов не превышает 40° ($\approx 2,2$ мс).

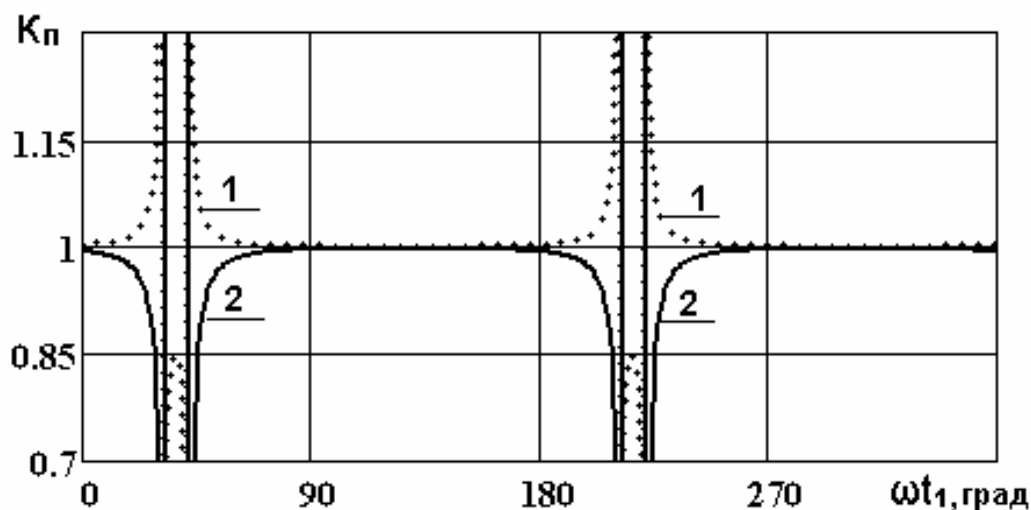


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента погрешности k_n от момента первого отсчета t_1 при продольной несимметрии: 1 – $k_{нс} = 0,3$; 2 – $k_{нс} = 1,7$.
Утечка в фазе В

На рисунке 3 приведены результаты аналогичных исследований при поперечной несимметрии (утечка в фазе С). Кривые приведены для $k_{нс} = 0,5$ (сплошная линия) и $k_{нс} = 1,5$ (пунктир), что составляет 50 % разброс поперечной проводимости фаз. Подобная несимметрия в реальных условиях маловероятна. Обусловлено это тем, что если разброс значений сопротивления изоляции вполне возможен, то такой же разброс емкости фаз (более весомый) маловероятен. Следовательно, исследование выполнено «с запасом». Анализируя результаты, можно заметить, что поперечная несимметрия более существенно влияет на значение вносимой погрешности. Прежде всего, это заметно по расширению неблагоприятной области, которая в

данной серии опытов достигает $\approx 75^\circ$, что соответствует добавочной задержке процесса идентификации почти на 4,2 мс. Тем не менее, алгоритм устойчиво работает при наличии определенной поперечной несимметрии.

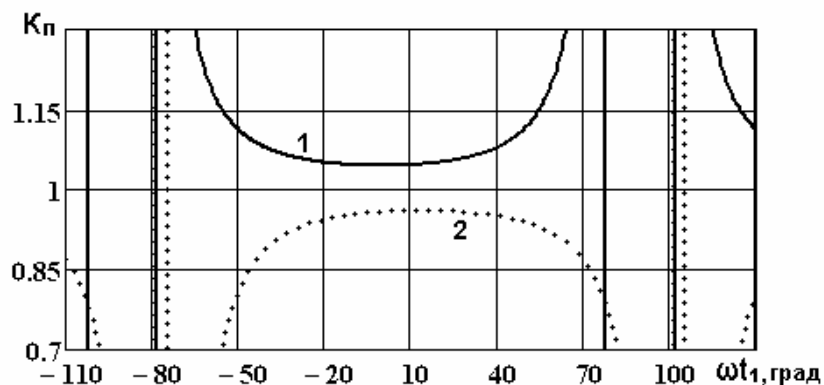


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента погрешности k_n от момента первого отсчета ωt_1 при поперечной несимметрии: 1) $k_{нс} = 0,5$; 2) $k_{нс} = 1,5$.
Утечка в фазе С

На рисунке 4 приведены результаты двух серий численных экспериментов, связанных с несимметрией источника питания.

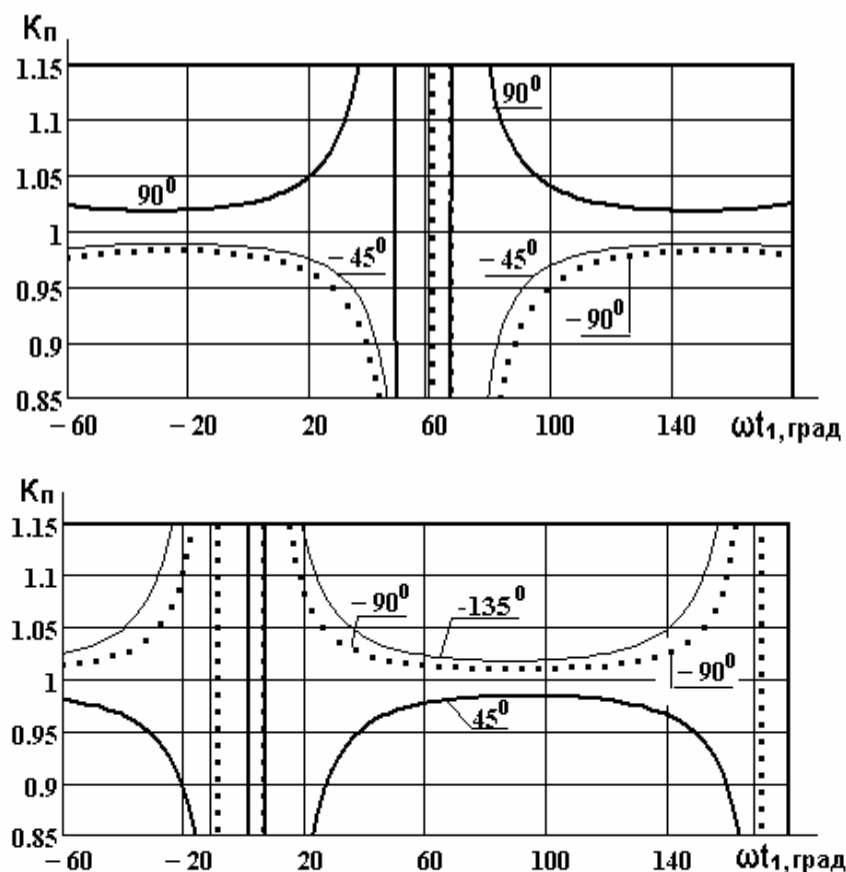


Рисунок 4 – Зависимости коэффициента погрешности k_n от момента отсчета ωt_1 при $E_2 = 0,1 \cdot E_1$ и различной начальной фазе. Утечка в фазе А (сверху). Утечка в фазе В (снизу)

Значение ЭДС обратной последовательности составляет 10 % по отношению к ЭДС прямой последовательности. Исследования выполнены для утечки в фазах А и В при различных значениях начальной фазы ЭДС обратной последовательности. На рисунке 4 представлены варианты, наиболее неблагоприятные по искажению, вносимому несимметрией источника. Несмотря на это, длительность неблагоприятной по вносимой погрешности области составляет около 40° ($\approx 2,2$ мс), что вполне приемлемо для нормальной работы алгоритма с достаточным запасом устойчивости и быстродействия.

Обращает на себя внимание то, что вносимые погрешности (искажения) имеют разные знаки, если аргументы обратной последовательности находятся в противофазе (например, углы 90° и минус 90° на левом рисунке, или 45° и минус 135° на правом). Это свидетельствует о существенном влиянии начальной фазы (аргумента) обратной последовательности на коэффициент погрешности k_n . Тем не менее, около 200° от периода потенциала нейтрали доступны для устойчивой идентификации по предложенному методу.

Вывод. Предложенный алгоритм идентификации поврежденной фазы по двум мгновенным значениям потенциала нейтрали работает с достаточным запасом быстродействия и устойчивости при всех видах несимметрии в сети.

Список литературы

1. Черноус Е.В. Моделирование режима заземляющего контура при двухфазном замыкании шахтной участковой сети в разнесенных точках / Е.В.Черноус // Донбас-2020: наука і техніка виробництву: матеріали ІІ науково-практичної конференції, 2004р.–Донецьк: ДонНТУ МОН, 2004.- С.353-357.
2. Научные основы (теория) электробезопасности / [Малиновский А.А., Никонец Л.А., Голубов С.В. и др.]; под ред. Л.А.Никонца.– Львов: НВФ «Українські технології», 2008. – 224 с.
3. Шуцкий В. И. Защитное шунтирование однофазных повреждений электроустановок / Шуцкий В.И., Жидков В.О., Ильин Ю.Н. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 152 с.
4. Черноус Е. В. Об альтернативном варианте защиты шахтной участковой сети от однофазной утечки / Е.В.Черноус // Электричество.- 2009.- №8.- С.33-36.