

---

УДК 622:(621.315.05+621.316.93).004.2

**А.В. АНТИПИН, зав. лаб.,**

**А.П. ЛИХВАН, ст. науч. сотрудник,**

**В.А. ГАВРИЛКО, ст. науч. сотрудник; МакНИИ, Макеевка**

## **ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМА ОДНОФАЗНОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ В ШАХТНЫХ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ СЕТЯХ**

*Проведены теоретические и экспериментальные исследования параметров переходных процессов при однофазных замыканиях на землю в шахтных высоковольтных сетях. Полученные результаты можно использовать при проектировании, конструировании шахтных комплектных распределительных устройств и выборе параметров срабатывания устройств защиты от замыкания на землю.*

**Ключевые слова:** исследования однофазных замыканий, шахтная высоковольтная сеть, активно-емкостной делитель.

Безопасность ведения горных работ во многом зависит от надежности электроснабжения, особенно во время аварийных ситуаций в системах электроснабжения. Основным видом повреждений в подземных кабельных сетях напряжением 6 кВ являются однофазные замыкания на землю (далее ОЗЗ), как через переходное сопротивление, так и дуговые. Замыкания на землю в шахтных сетях следует отключать мгновенно, т.к. они могут привести к воспламенению метановоздушной смеси и стать причиной электропоражения обслуживающего персонала. При этом существует опасность перехода замыкания на землю одной фазы в двойное замыкание, что также может привести к возникновению взрывов и пожаров.

В случае неправильного выбора уставок срабатывания устройств защиты от ОЗЗ происходят ложные отключения неповрежденных участков шахтной сети, что приводит к длительному простоею основного технологического оборудования и затрудняет поиск места повреждения. Поэтому вопрос обеспечения селективности работы устройств защиты от ОЗЗ является весьма актуальным.

Целью проведенной работы являлось исследование параметров режима однофазного замыкания на землю.

В ходе проводившихся исследований решались задачи определения уровня исследуемых сигналов в высоковольтной сети в зависимости от параметров режима ОЗЗ (емкости сети и величины сопротивления утечки), а также сравнения полученных экспериментальных данных с расчетными.

Рассмотрим процесс однофазного замыкания на землю через переходное сопротивление в высоковольтной сети с изолированной нейтралью (рис. 1).

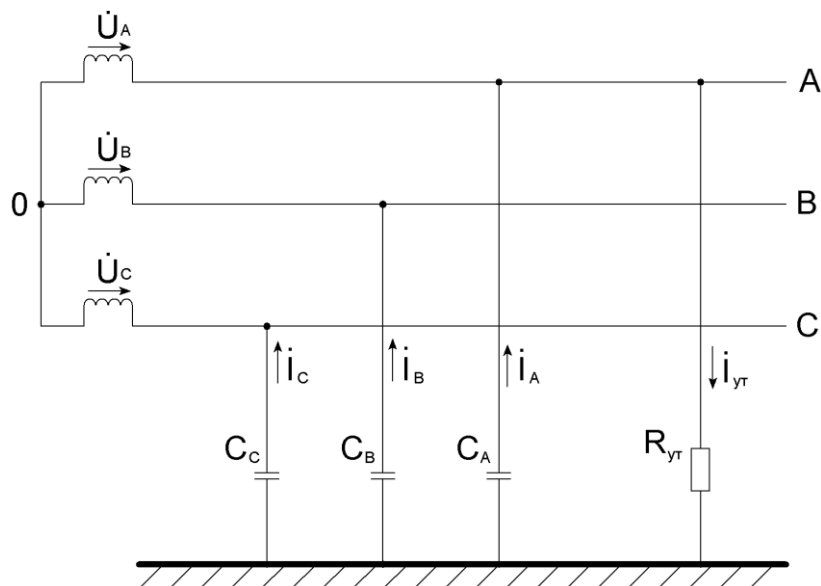


Рис. 1. Однофазное замыкание на землю через переходное сопротивление в высоковольтной сети с изолированной нейтралью

При замыкании на землю одной из фаз (например, фазы А) происходит смещение нулевой точки «0» из центра треугольника линейных напряжений в точку «0'». В результате этого изменяются и фазные напряжения сети (рис. 2).

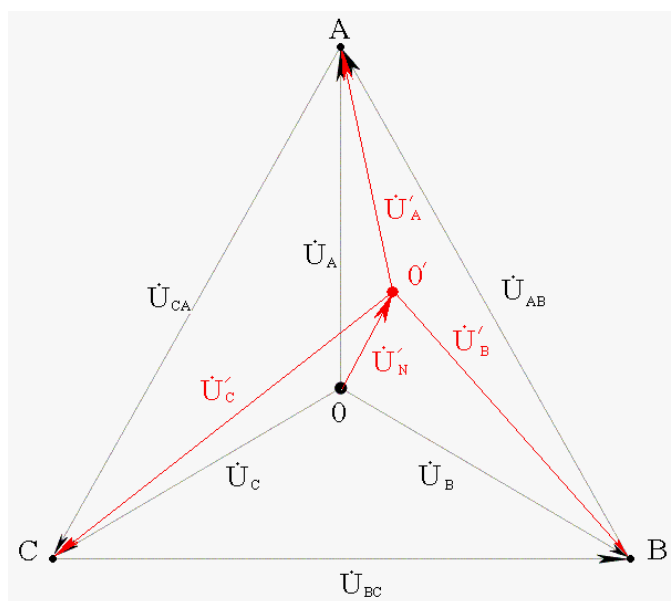


Рис. 2. Векторная диаграмма напряжений в сети с изолированной нейтралью

Ток однофазного замыкания через переходное сопротивление (ток утечки  $\dot{I}_{\text{ут}}$ ) в месте повреждения, если известна величина напряжения поврежденной фазы относительно земли  $\dot{U}_{\text{ут}}$ , рассчитывается по формуле [1], [2]:

$$\dot{I}_{\text{ут}} = \dot{U}_{\text{ут}} Y_{\text{ут}}, \quad (1)$$

где  $Y_{\text{ут}} = 1/R_{\text{ут}}$  – проводимость в месте замыкания на землю.

Напряжение каждой фазы относительно земли в данном случае определяется из соотношения:

$$\dot{U}'_A = \dot{U}_A - \dot{U}_N, \quad (2)$$

$$\dot{U}'_B = \dot{U}_B - \dot{U}_N, \quad (3)$$

$$\dot{U}'_C = \dot{U}_C - \dot{U}_N, \quad (4)$$

где  $\dot{U}_N$  – напряжение смещения нейтрали.

Напряжение между нулевой точкой сети и землей (напряжение смещения нейтрали) в общем случае вычисляется по формуле:

$$\dot{U}_N = \frac{\dot{U}_A Y_A + \dot{U}_B Y_B + \dot{U}_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C}, \quad (5)$$

где  $Y_A, Y_B, Y_C$  – проводимости фаз относительно земли.

В случае возникновения однофазного замыкания на землю через переходное сопротивление напряжение смещения нейтрали определяется из соотношения [2]:

$$\dot{U}_N = \frac{\dot{U}_A (Y_A + Y_{\text{ут}}) + \dot{U}_B Y_B + \dot{U}_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C + Y_{\text{ут}}}. \quad (6)$$

Принимая то, что активные проводимости каждой из фаз бесконечно малы (сопротивление изоляции каждой из фаз до появления утечки несоизмеримо велико), имеем:

$$Y_A = Y_B = Y_C = j\omega c, \quad (7)$$

где  $\omega$  – угловая частота сети,  $c$  – емкость каждой фазы относительно земли.

Решая совместно выражения (1)–(7) и переходя от комплексной формы записи к модульным значениям, можно определить:

$$U_N = \frac{U_\phi}{\sqrt{1 + \omega^2 C_0^2 R_{YT}^2}}, \quad (8)$$

$$U_{YT} = \frac{U_\phi R_{YT} \omega C_0}{\sqrt{1 + \omega^2 C_0^2 R_{YT}^2}}, \quad (9)$$

$$I_{YT} = \frac{U_\phi \omega C_0}{\sqrt{1 + \omega^2 C_0^2 R_{YT}^2}}, \quad (10)$$

где  $U_\phi$  – фазное напряжение сети;

$C_0 = c_1 + c_2 + c_3$  – суммарная емкость всех трех фаз сети.

На рис. 3 представлены графики зависимости  $U_N = f(R_{YT})$ , построенные согласно расчетам, проведенным на ЭВМ по полученному выражению (8). Расчеты проведены при различных значениях емкости сети для номинальных линейных напряжений 6 и 3 кВ (номинальные фазные напряжения 3,64 и 1,91 кВ соответственно).

На рис. 4 для номинального напряжения сети 6 кВ представлены следующие графики:  $U1$  – при емкости сети 0,3 мкФ/фазу,  $U2$  – 1,0 мкФ/фазу,  $U3$  – 1,8 мкФ/фазу соответственно, и для напряжения сети 3 кВ, аналогично,  $U4$  – 0,3 мкФ/фазу,  $U5$  – 1,0 мкФ/фазу,  $U6$  – 1,8 мкФ/фазу.

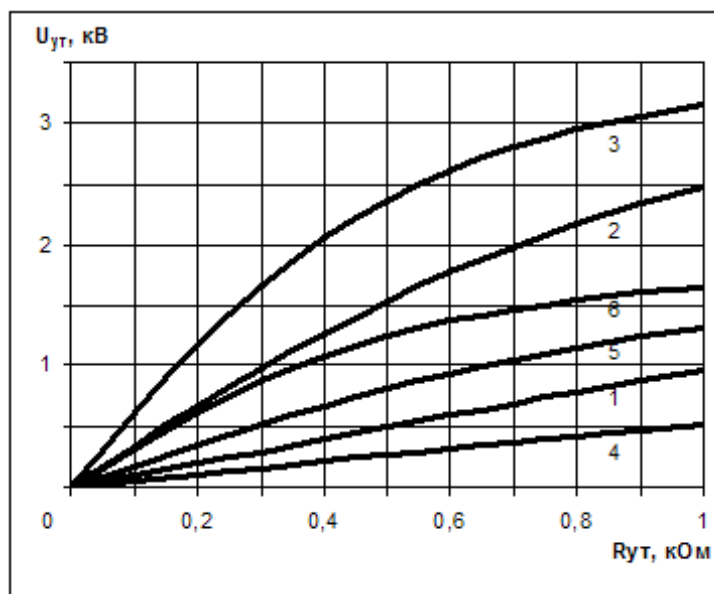


Рис. 4. Графики зависимости  $U_{YT} = f(R_{YT})$

На рис. 5 представлены графики зависимости  $I_{ут}=f(R_{ут})$ , полученные из расчетов согласно выражению (10). На указанном рисунке изображены графики изменения тока утечки для номинального напряжения сети 6 кВ:  $I_1$  – при емкости сети 0,3 мкФ/фазу,  $I_2$  – 1,0 мкФ/фазу,  $I_3$  – 1,8 мкФ/фазу соответственно, а также аналогично для напряжения сети 3 кВ:  $I_4$  – 0,3 мкФ/фазу,  $I_5$  – 1,0 мкФ/фазу,  $I_6$  – 1,8 мкФ/фазу.

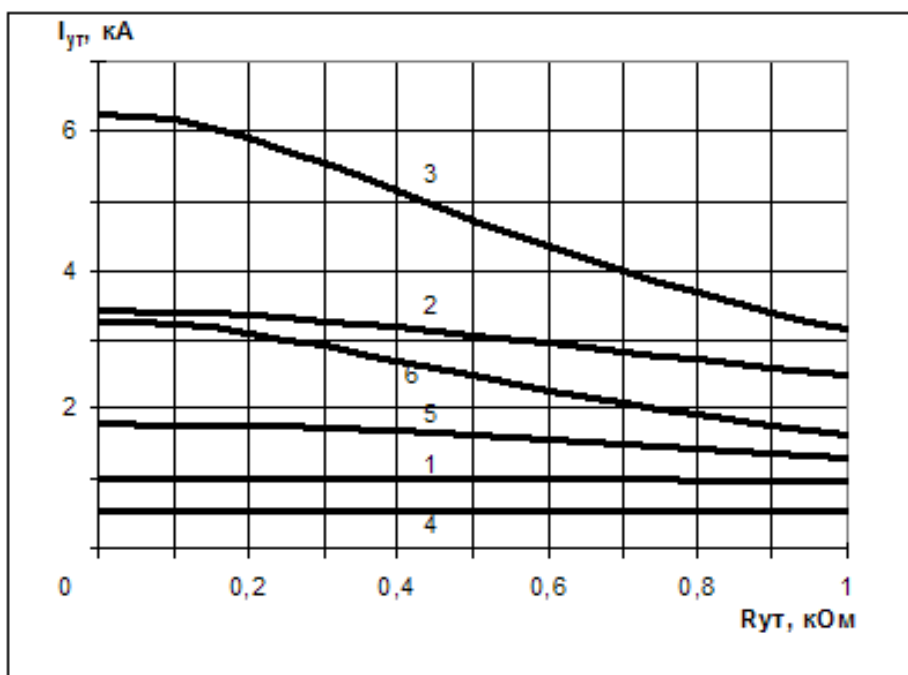


Рис. 5. Графики зависимости  $I_{ут}=f(R_{ут})$

Экспериментальные исследования проводились в высоковольтной сети, состоящей из реальных рудничных взрывозащищенных КРУ (КРУВ-6 и РВД-6), широко применяемых на угольных шахтах Украины, и кабелей марок СБ и ВВБШв. Схема экспериментальной сети приведена на рисунке 6.

При этом для того, чтобы исключить влияние сетевых помех на точность эксперимента, использовался разделительный трансформатор типа ТСШВ-630/6/6, имеющий на вторичной обмотке выведенную нулевую точку. На вход трансформатора подавались напряжения 6 кВ или 3 кВ в зависимости от цели проводившихся экспериментов. Емкости исходной сети и емкости отходящих линий моделировались как при помощи реальных кабельных линий, так и при помощи конденсаторных батарей. Сопротивления утечки моделировались при помощи резисторов необходимой мощности, подключаемых к одной из фаз сети вакуумным контактором, установленным на испытательном поле. Измерения проводились путем осциллографирования напряжения смещения нейтрали и напряжения на ак-

тивно-емкостных делителях, подключаемых соответственно в нулевой точке разделительного трансформатора и к «поврежденной» фазе линии на испытательном поле.

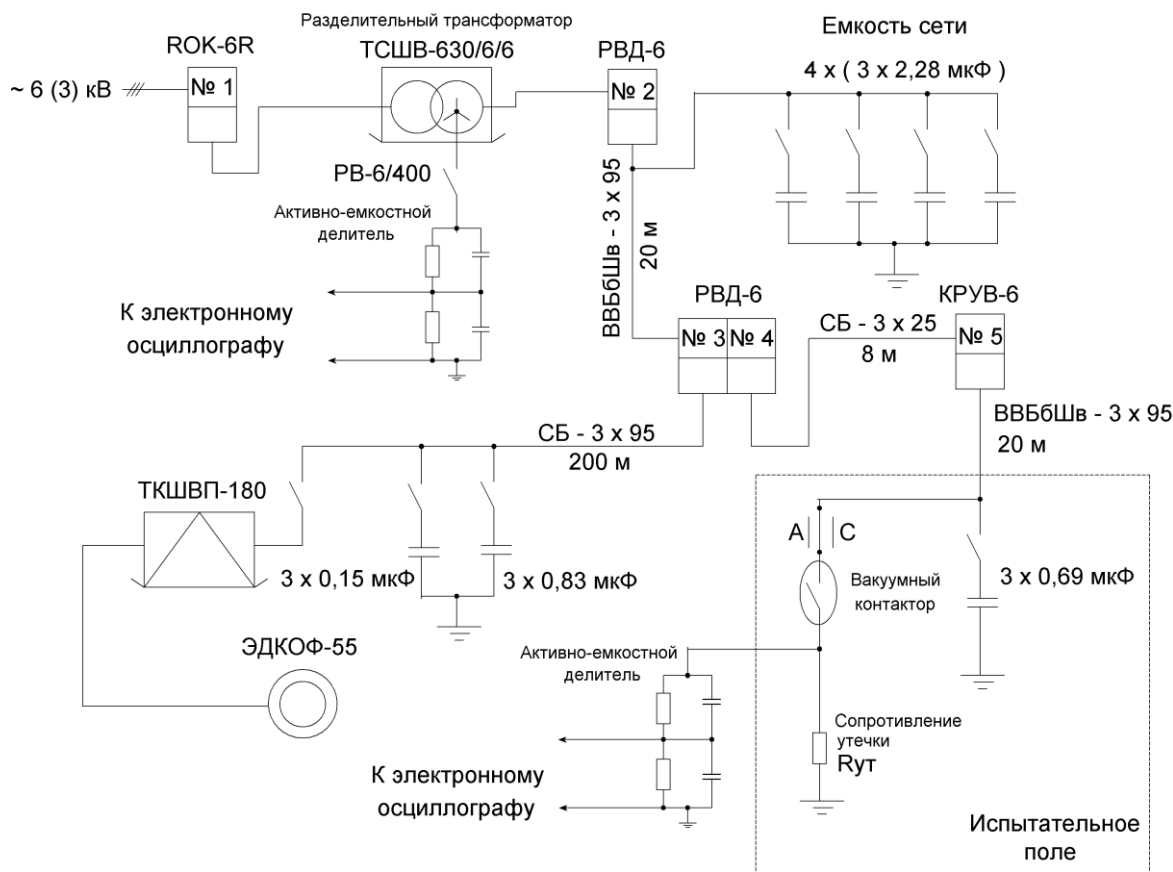


Рис. 6. Схема экспериментальной сети

Результаты экспериментальных исследований при различных параметрах в сети 3 и 6 кВ приведены в табл. 1.

Как и следовало ожидать, данные табл. 1, отражающие результаты экспериментальных исследований в реальной высоковольтной сети, несколько отличаются от значений, полученных расчетным путем. Максимальное значение относительной погрешности не превышает 15%. Данное обстоятельство объясняется не столько погрешностью измерительных приборов и используемой аппаратуры, сколько принятыми при расчетах допущениями и упрощениями. Реальная экспериментальная сеть, состоящая из отрезков кабельных линий, комплектных распределительных устройств, трансформаторов и конденсаторов, обладает рядом характеристик, которые сложно учесть при расчетах. К ним следует отнести и наличие емкости кабельных линий, и конечное значение активного сопротивления изоляции

всех элементов сети, и токи утечки в конденсаторных батареях, и возникновение переходных процессов в момент замыкания фазы сети на землю вакуумным контактором, и отклонения напряжения в сети электроснабжения.

Таблица 1

## Результаты экспериментальных исследований в сети 6 кВ

Сопротивление утечки $R_{ут}$ , кОм	Емкость сети $c_c$ , мкФ/фазу	Напряжение смещения нейтралей $U_N$ , кВ	Напряжение поврежденной фазы $U_{ут}$ , кВ	Ток утечки $I_{ут}$ , А
Напряжение сети 6 кВ				
0,3	0,3	3,56	0,27	0,9
	0,99	3,50	0,83	2,77
	1,82	3,23	1,46	4,87
0,5	0,3	3,54	0,61	1,22
	0,99	3,25	1,32	2,64
	1,82	2,67	2,09	4,18
1,0	0,3	3,45	1,06	1,06
	0,99	2,65	2,25	2,25
	1,82	1,83	2,83	2,83
Напряжение сети 3 кВ				
0,3	0,3	1,96	0,14	0,47
	0,99	1,90	0,48	1,6
	1,82	1,79	0,78	2,62
1,0	0,3	1,88	0,44	0,44
	0,99	1,45	1,14	1,14
	1,82	0,99	1,49	1,49

Однако представленная на рис. 6 экспериментальная сеть максимально близка к реальной высоковольтной сети угольной шахты. Поэтому полученные результаты экспериментальных исследований представляют большой интерес при проектировании и конструировании шахтных высоковольтных аппаратов, выборе уставок срабатывания устройств защиты, а также могут быть использованы для повышения уровня безопасности шахтных высоковольтных сетей.

## ВЫВОДЫ

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования режима однофазного замыкания на землю в шахтных высоковольтных сетях позволили установить соотношения между основными электрическими параметрами (напряжением смещения нейтрали, напряжением на поврежденной фазе, током утечки).

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и конструировании шахтных высоковольтных аппаратов и выборе уставок срабатывания конкретных устройств защиты. Кроме того, полученные результаты экспериментальных исследований представляют большой интерес для повышения уровня безопасности шахтных высоковольтных сетей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колосюк В. П. Защитное отключение рудничных электроустановок / В. П. Колосюк. – М.: Недра, 1980. – 334 с.
2. Римап Я. С. Защита подземных электрических установок угольных шахт / Я. С. Римап. – М.: Недра, 1977. – 206 с.

Получено: 17.09.2013

*Проведено теоретичні та експериментальні дослідження параметрів перехідних процесів під час однофазних замикань на землю у шахтних високовольтних мережах. Отримані результати можна використовувати під час проектування, конструювання шахтних комплексних розподільних пристроїв та обирання параметрів спрацьовування пристроїв захисту від замикання на землю.*

**Ключові слова:** дослідження однофазних замикань, шахтна високовольтна мережа, активно-ємнісний дільник.

*Both theoretical and experience-based researches of transient phenomena parameters by single phase-to-earth fault in mine high-voltage networks have been carried out. The results received can be used by designing and engineering of mine complete distribution devices and by choosing the parameters of operate values of protection devices against earth-faults.*

**Keywords:** research of single-phase faults, mine high-voltage network, resistance-capacitance divider.