

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ШАХТНОЙ УЧАСТКОВОЙ СЕТИ ПРИ ДВУХФАЗНОМ ЗАМЫКАНИИ НА ЗАЗЕМЛЯЮЩИЙ КОНТУР

Ковалев А.П., Черноус В.П., Черноус Е.В.

Донецкий национальный технический университет  
 pm@cld.dgtu.donetsk.ua

*Reserched are the models of district mine network at two-phase short-circuit on grounding connection in different points of that one. It is determined, that the currents in ground network are dangerous for the explosion or fire, but they are not sensible for the maximal current protection.*

При эксплуатации участков шахтных сетей напряжением 660 В с изолированной нейтралью особую опасность представляют двойные замыкания двух различных фаз на заземляющий контур в различных его точках. При этом электрооборудование участка, находящееся между двумя точками замыкания на заземляющий контур оказывается под опасным потенциалом. Случайное прикосновение человека к корпусу электрооборудования приводит к поражению его электрическим током вне зависимости от состояния местных заземлителей. Кроме того, при наличии ослабленного контакта в заземляющей сети на нем при протекании тока возможны искрения или дугообразования, опасные в отношении взрыва и пожара. Известны случаи, когда на различных участках происходило замыкание фазы на заземляющую сеть, а ослабленный контакт находился в тупиковой выработке с опасной концентрацией метановоздушной смеси (система газовой защиты не работала). Совпадение этих событий привело к взрыву в тупиковой выработке.

На одной из шахт Донбасса при двойном замыкании в различных точках и фазах на заземляющий контур ток последнего стал причиной пожара в выработке вследствие разогрева угольной пыли до температуры возгорания.

Описанные выше случаи возможны, если независимо друг от друга происходят замыкания на заземляющий контур в различных точках и фазах сети, а защитное отключение находится в отказавшем состоянии (уставка заглублена, защита отключена, отказ привода системы отключения). При этом максимальная токовая защита может оказаться не чувствительной к аварийным токам, протекающим между двумя точками замыкания на заземляющий контур [1].

Цель данной работы – предложить математические модели для исследования участковой сети совместно с сетью заземления, оценить значения аварийных токов, протекающих по основной и заземляющей сетям, двумя различными методами, выбрать наиболее рациональный метод для решения подобных задач.

Одним из распространенных методов исследования сложных линейных цепей является метод узловых потенциалов (МУП), который легко формализуется [3,4] и удобен для моделирования на ЭВМ. Однако, МУП не учитывает реакцию вращающихся машин на составляющие токов обратной последовательности и реакцию кабелей на токи нулевой последовательности, что может вызвать сомнение в достоверности полученных результатов.

Метод симметричных составляющих (МСС) лишен этого недостатка, однако он трудоемок, громоздкий и трудно формализуем из-за необходимости целого ряда «ручных» преобразований, зависящих от конфигурации как основной цепи, так и сети заземления, что повышает вероятность ошибок моделирования. Для обеспечения надежности результатов были использованы оба метода с последующим сопоставлением результатов. Так как МУП достаточно описан в [3, 4], то в данной работе математическая модель на его основе не описывается, а все внимание уделяется модели на основе МСС.

Эквивалентная схема шахтной участковой сети совместно с заземляющим контуром приведена на рис. 1. Она содержит эквивалентный трехфазный источник  $E$ , представляющий участковую подстанцию с учетом внутреннего сопротивления трансформатора, продольного  $ZL0$  и поперечного  $Zu0$  сопротивлений кабеля, соединяющего подстанцию с участковым распределительным пунктом (УРП), а также продольного ( $ZL1, ZL2$ ) и поперечного ( $Zu1, Zu2$ ) сопротивлений кабелей, соединяющих УРП с наиболее мощными потребителями участка. Нагрузка представлена эквивалентными сопротивлениями двигателей  $Zn1$ , и  $Zn2$ , а заземляющая сеть – сопротивлениями заземляющих жил кабелей  $R_0, R_1, R_2$  и сопротивлениями местных заземлителей  $R_3$  и  $R_4$ .

На схеме рис.1 первые индексы токов соответствуют номеру ветви исследуемой цепи, а вторые индексы 0, 1, 2 фазам А, В, С этих же ветвей соответственно. Токи заземляющего контура, которые нельзя отнести к какой-либо конкретной фазе, представлены вектором  $Iz$  с индексацией согласно схеме рис. 1. В качестве основного варианта аварийной ситуации принято замыкание на корпус первого механизма фазы А, а на корпус второго механизма – фазы С источника питания. На рис. 1 это имитируется токами  $IA1, IC2$  соответственно.

Применение МСС предусматривает замену двух участков несимметрии между точками пробоя (выходы токов  $IA1, IC2$  на рис. 1) и точкой нулевого потенциала двумя эквивалентными системами симметричных составляющих напряжения  $Us1_k, Us2_k$  ( $k=0,1,2$ ), как это показано на рис. 2 и рис. 3. Символ  $s$  на этих схемах говорит о принадлежности к симметричным составляющим, а индексы 0, 1, 2 относятся для напряжений соответ-

ственно к нулевой, прямой и обратной последовательностям. Параметры схем замещения по отношению к симметричным составляющим определены с учетом [2, 5, 6].

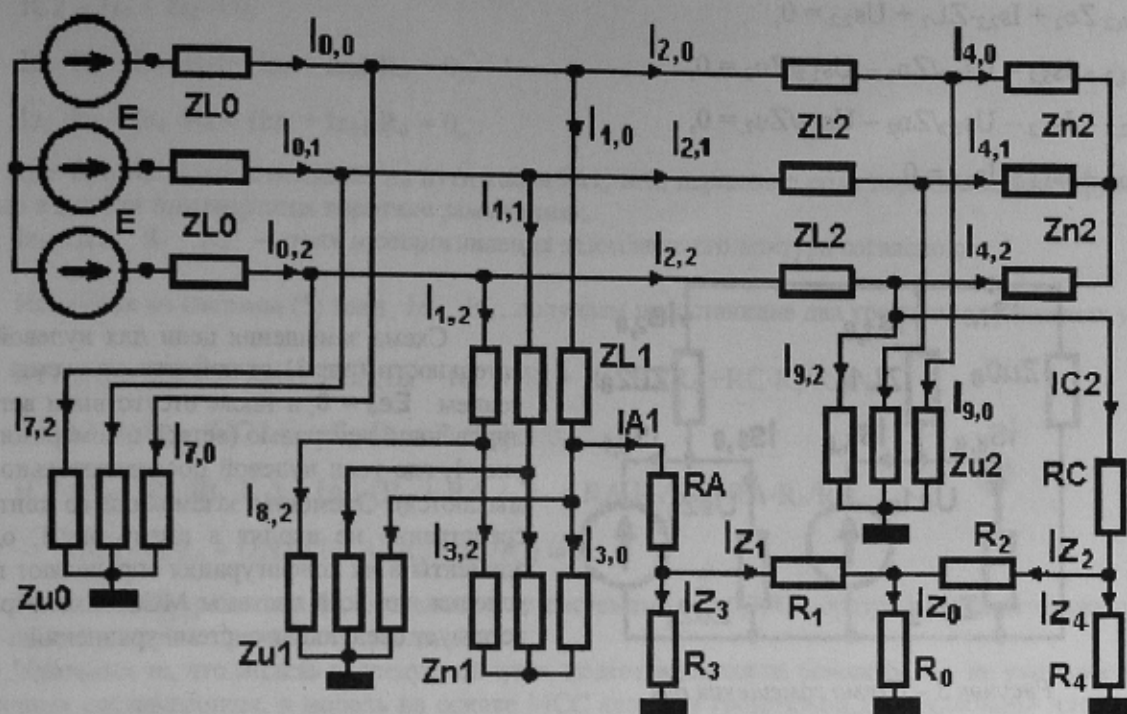


Рисунок 1 - Схема участковой цепи и заземляющего контура

На рис.2 приведена эквивалентная схема замещения фазы А цепи для прямой последовательности. Она содержит эквивалентный источник  $E_{e1}$ ,  $Z_{e1}$ . Две области несимметрии имитируются вводом двух источников  $U_{s1,1}$ ,  $U_{s2,1}$ . Схема рис.1 не содержит элементов контура заземления, так как токи прямой и обратной последовательностей в этом контуре не замыкаются.

Схеме рис. 2 соответствует система уравнений для прямой последовательности:

$$I_{s0,1} \cdot Z_{e1} + I_{s1,1} \cdot ZL_1 + U_{s1,1} = E_{e1},$$

$$I_{s0,1} \cdot Z_{e1} + I_{s2,1} \cdot ZL_2 + U_{s2,1} = E_{e1},$$

$$I_{s1,1} - I_{s5,1} - U_{s1,1}/Zn_1 - U_{s1,1}/Zu_1 = 0,$$

$$I_{s2,1} - I_{s6,1} - U_{s2,1}/Zn_2 - U_{s2,1}/Zu_2 = 0,$$

$$I_{s0,1} - I_{s1,1} - I_{s2,1} = 0.$$

(1)

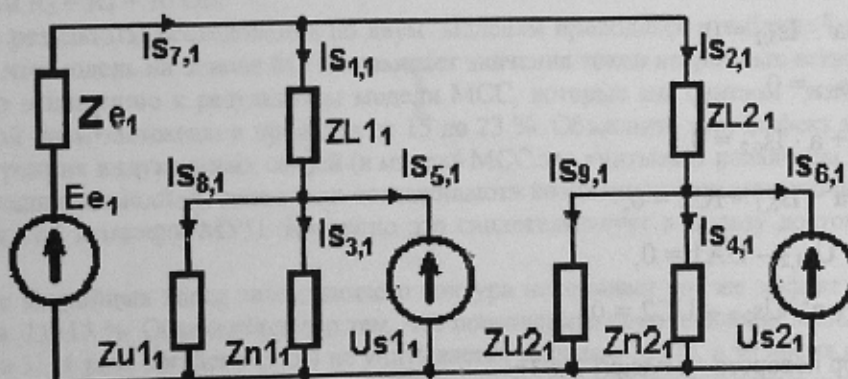


Рисунок 2 - Схема замещения для прямой последовательности

Схема замещения для обратной последовательности отличается от схемы рис.2 только значениями параметров, имеющих индекс 2, причем, численные значения этих параметров отличаются только у двигателей. Отличием является также значение  $E_{e2} = 0$ , так как источник питания предполагается симметричным и не может содержать составляющую обратной последовательности. Схеме замещения для обратной последовательности

соответствует аналогичная система уравнений:

$$I_{s_{0,2}} \cdot Z_{e_2} + I_{s_{1,2}} \cdot ZL_2 + U_{s_{1,2}} = 0,$$

$$I_{s_{0,2}} \cdot Z_{e_2} + I_{s_{2,2}} \cdot ZL_2 + U_{s_{2,2}} = 0,$$

$$I_{s_{1,2}} - I_{s_{5,2}} - U_{s_{1,2}}/Zn_2 - U_{s_{1,2}}/Zu_2 = 0,$$

$$I_{s_{2,2}} - I_{s_{6,2}} - U_{s_{2,2}}/Zn_2 - U_{s_{2,2}}/Zu_2 = 0,$$

$$I_{s_{0,2}} - I_{s_{1,2}} - I_{s_{2,2}} = 0.$$

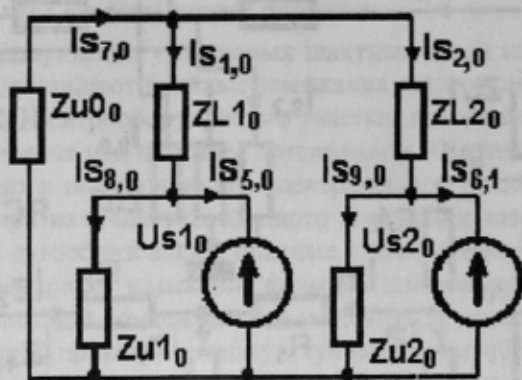


Рисунок 3 – Схема замещения для нулевой последовательности

Схема замещения цепи для нулевой последовательности (рис.3) отличается от схемы рис.2 значением  $E_{e_0} = 0$ , а также отсутствием ветвей с изолированной нейтралью (ветвей с номерами 0, 3, 4 на рис. 1, где токи нулевой последовательности не замыкаются). Элементы заземляющего контура непосредственно не входят в схему рис.3, однако эти элементы и их конфигурация определяют граничные условия для всей системы MCC. Схеме рис.3 соответствует следующая система уравнений:

$$I_{s_{1,0}} \cdot ZL1_0 + U_{s_{1,0}} - U_{s_{2,0}} - I_{s_{2,0}} \cdot ZL2_0 = 0,$$

$$I_{s_{1,0}} \cdot ZL1_0 + U_{s_{1,0}} + I_{s_{1,0}} \cdot Zu0_0 + I_{s_{2,0}} \cdot Zu0_0 = 0,$$

$$I_{s_{1,0}} - I_{s_{5,0}} - U_{s_{1,0}}/Zu1_0 = 0,$$

$$I_{s_{2,0}} - I_{s_{6,0}} - U_{s_{2,0}}/Zu2_0 = 0.$$

В системах (1), (2), (3) первый индекс тока соответствует номеру ветви на рис.2 и рис.3, а второй индекс – номеру симметричной составляющей каждого из токов.

Полученные 14 уравнений содержат 24 неизвестных. Недостающие 10 уравнений должны быть получены из граничных условий. Восемь из них получаются из известных свойств симметричных составляющих [3,4]:

$$I_{s_{5,0}} + I_{s_{5,1}} + I_{s_{5,2}} - IA1 = 0,$$

$$I_{s_{5,0}} + a^2 \cdot I_{s_{5,1}} + a \cdot I_{s_{5,2}} = 0,$$

$$I_{s_{5,0}} + a \cdot I_{s_{5,1}} + a^2 \cdot I_{s_{5,2}} = 0,$$

$$I_{s_{6,0}} + I_{s_{6,1}} + I_{s_{6,2}} = 0,$$

$$I_{s_{6,0}} + a^2 \cdot I_{s_{6,1}} + a \cdot I_{s_{6,2}} = 0,$$

$$I_{s_{6,0}} + a \cdot I_{s_{6,1}} + a^2 \cdot I_{s_{6,2}} - IC2 = 0,$$

$$U_{s_{1,0}} + U_{s_{1,1}} + U_{s_{1,2}} - UA1 = 0,$$

$$U_{s_{2,0}} + a \cdot U_{s_{2,1}} + a^2 \cdot U_{s_{2,2}} - UC2 = 0,$$

где  $a$  – оператор поворота  $a = \exp(j \cdot 2 \cdot \pi / 3)$ ;

$IA1, IC2$  – токи короткого замыкания в точках пробоя на корпус;

$UA1, UC2$  – напряжения между точками пробоя на корпус и точками нулевого потенциала (землей).

Недостающие два уравнения необходимо получить из более детального анализа схемы замещения заземляющего контура рис.1, которая описывается следующей системой уравнений по законам Кирхгофа:

$$IA1 \cdot RA + Iz_3 \cdot R_3 - UA1 = 0,$$

$$IC2 \cdot RC + Iz_4 \cdot R_4 - UC2 = 0,$$

$$IA1 - Iz_3 - Iz_1 = 0,$$

$$IC2 - Iz_4 - Iz_2 = 0,$$

$$Iz_1 \cdot R_1 - Iz_3 \cdot R_3 + (Iz_1 + Iz_2) \cdot R_0 = 0,$$

$$Iz_2 \cdot R_2 - Iz_4 \cdot R_4 + (Iz_1 + Iz_2) \cdot R_0 = 0,$$

где RA, RC – сопротивления на пути токов IA1, IC2, играющие роль переключающих функций (с их помощью в модели имитируются короткие замыкания);

Iz1...Iz4, R1...R4 – токи и сопротивления заземляющего контура согласно рис. 1.

Исключая из системы (5) токи Iz1...Iz4, получаем недостающие два уравнения граничных условий:

$$IA1 \cdot (R_0 + R_0 \cdot RA/R_3) + IC2 \cdot (R_0 + RC + R_2 + RC \cdot R_0/R_4 + RC \cdot R_2/R_4) - UA1 \cdot R_0/R_3 - UC2 \cdot (1 + R_2/R_4 + R_0/R_4) = 0; \quad (6)$$

$$IC2 \cdot (R_0 + R_0 \cdot RC/R_4) + IA1 \cdot (R_0 + RA + R_1 + RA \cdot R_0/R_3 + RA \cdot R_1/R_3) - UC2 \cdot R_0/R_4 - UA1 \cdot (1 + R_1/R_3 + R_0/R_3) = 0. \quad (7)$$

Полученные уравнения (6,7) совместно с системами (1,2,3,4) образуют математическую модель цепи рис. 1 по методу симметричных составляющих.

Учитывая то, что модель исследуемой цепи, подготовленная на основе МУП, не учитывает влияние симметричных составляющих, а модель на основе МСС является громоздкой и «неудобной» для программирования, надежность и достоверность результатов обеспечивалась следующими мерами:

1. На первом этапе обе модели были опробованы и отлажены при номинальном, хорошо изученном симметричном режиме, когда нулевая и обратная последовательности отсутствуют и, следовательно, результаты работы обеих программ заведомо идентичны.

2. На втором этапе обе модели были опробованы при моделировании однофазного замыкания на землю. Этот режим цепей с изолированной нейтралью также достаточно хорошо изучен [1, 5, 6]. Для него характерно практически полное отсутствие изменений в режиме токов, но существенное перераспределение потенциалов, что позволило уточнить коррекцию моделей и оценить уровень достоверности результатов.

3. Для исключения ошибок, обусловленных случайными сбоями в работе программ (что случается не так уж редко), работа последних постоянно контролировалась путем проверки баланса мощностей<sup>1</sup>, а также суммы токов базового узла<sup>2</sup>.

Исследование выполнялось для сети с номинальным напряжением 660 В при рабочей мощности двигателей 110 и 90 кВт. Длина питающих гибких кабелей составляла 50, 200 и 250 метров. Сопротивление заземляющих жил кабелей, соединяющих УРП с двигателями комбайна и конвейера, и по которым замыкается основная часть токов короткого замыкания, составила согласно [6]  $R_1 = R_2 = 0,36$  Ом. Эквивалентное сопротивление местных заземлителей, значение которых согласно [1] не нормируется, было принято (для базового варианта) равным  $R_3 = R_4 = 10$  Ом.

Основные результаты исследования по двум моделям приводятся в таблице 1. Сравнение этих результатов показывает, что модель на основе МУП завышает значения токов аварийных ветвей (завышение составляет от 12 до 17% по отношению к результатам модели МСС, которые мы считаем «истинными»). В то же время токи неаварийной фазы занижены в пределах от 15 до 23%. Объяснить этот эффект можно тем, что двигатели из-за своих внутренних индуктивных связей (а модель МСС это учитывает различием в сопротивлениях прямой и обратной последовательностей) несколько «сглаживают» возникшую асимметрию по сравнению с «обычной» пассивной нагрузкой в модели МУП. Косвенно это свидетельствует в пользу достоверности полученных результатов.

Сравнение аварийных токов заземляющего контура показывает тот же эффект – модель МУП завышает эти величины на 11–15%. Объясняется это тем, что повышенное сопротивление кабелей токам нулевой последовательности (в 3...4 раза согласно [3,5]) не учитывается моделью МУП, в то время как модель МСС это учитывает. Но по контуру заземления замыкаются именно токи нулевой последовательности.

<sup>1</sup> В модели МСС мощность потребителей определялась по каждой симметричной составляющей в отдельности с последующим их суммированием.

<sup>2</sup> В качестве базового узла «по умолчанию» принимается земля.

Таблица 1 - Основные результаты исследований

№ п/п	Исследуемые токи		Значения токов, А		Отклонение результатов, %
	Наименование	Обознач. по схеме рис.1	Модель МУП	Модель МСС	
1	Кабель на УРП	$I_{0,0}$	959	845	13.5
		$I_{0,1}$	217	270	-19.6
		$I_{0,2}$	858	709	21.0
2	Кабель первого двигателя	$I_{1,0}$	869	745	16.7
		$I_{1,1}$	120	156	-23.1
		$I_{1,2}$	114	108	5.5
3	Кабель второго двигателя	$I_{2,0}$	90	101	-10.0
		$I_{2,1}$	97	116	-16.4
		$I_{2,2}$	797	678	17.5
4	Заземляющие жилы кабелей	$I_{z_1}$	736	637	15.5
		$I_{z_2}$	736	637	15.5
	Местные заземлители	$I_{z_3}$	26.5	23	15.2
		$I_{z_4}$	26.5	23	15.2

Представляет интерес сопоставление полученных результатов с данными других режимов этой же цепи, полученных на модели МСС (и не представленных в таблице 1):

- при пуске первого (более мощного) двигателя и работающем втором, ток кабеля, соединяющего подстанцию с УРП составил  $I_{0,0} = 880$  А; пусковой ток первого двигателя  $I_{1,0} = 791$  А; ток работающего двигателя  $I_{2,0} = 95$  А (в этой ситуации режим симметричный), из чего ясно, что токи исследованной аварийной ситуации практически не отличаются от токов пускового режима;
- при двухфазном замыкании, когда токи КЗ не замыкаются по контуру заземления, получены значения токов аварийных фаз в пределах 2.1...2.2 кА, что в 2,5 раза больше пусковых токов;
- исследование токов открытых частей местных заземлителей (т.е. токов  $I_{z_3}$ ,  $I_{z_4}$  на рис.1) показало, что их значения в зависимости от сопротивления местных заземлителей (которое не нормируется) может находится в пределах от 5 до 45 А. Такие значения токов при наличии ослабленного контакта в контуре могут представлять серьезную опасность с точки зрения искрообразования.

## ВЫВОДЫ

1. Для всех исследованных аварийных ситуаций обе математические модели дают близкие результаты, что свидетельствует о их достаточной для практики достоверности. Различия в результатах составляет в среднем 15% причем модель, построенная на основе метода узловых потенциалов, несколько завышает значения аварийных токов, так как не учитывает «сглаживающего» влияния вращающихся машин на возникшую асимметрию.
2. Исследования разработанных математических моделей показало, что аварийные токи при двойном замыкании в различных точках и фазах сети на заземляющий контур зависят не только от длины питающих кабельных линий, но также от эквивалентного сопротивления заземляющей сети, причем, эти токи практически равны пусковому току двигателя и в 2...2.5 раза меньше токов «обычного» двухфазного КЗ.
3. В зависимости от сопротивления местных заземлителей, по ним могут протекать аварийные токи в пределах от 5 до 45 А, что представляет опасность в отношении взрывов и пожаров в выработках угольных шахт.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Лейбов Р.М., Озерной М.И. Электрификация подземных горных работ. М.: «Недра», 1972.-465 с.
2. Манойлов В.Е. Основы электробезопасности. Л.: «Энергия», 1976.-420 с.
3. Перхач В.С. Теоретична електротехніка. К.: «Вища школа», 1992.-439 с.
4. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники. Л.: «Энергия», 1964.-425 с.
5. Винославский, В.Н., Пивняк Г.Г. Переходные процессы в системах электроснабжения.К.: «Вища школа», 1989.- 430 с.
6. Дзюбан В.С., Риман Я.С. Справочник энергетика угольной шахты. М.: «Недра», 1983.-525 с.