

УДК 621.3:658.34; 621.3:331.34; 621.3:331.4

В.В. Нагорных, Ю.Е. Бабичев

**О ПОГРЕШНОСТЯХ НЕПРЕРЫВНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ПАРАМЕТРОВ ИЗОЛЯЦИИ ОТДЕЛЬНЫХ ФАЗ
ОТНОСИТЕЛЬНО ЗЕМЛИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
СЕТЯХ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ**

Проанализированы погрешности метода добавочной проводимости для определения параметров изоляции трехфазных электрических сетей с изолированной нейтралью. Приведены результаты аналитических и экспериментальных исследований непрерывного контроля параметров изоляции и определено влияние измерительных погрешностей на точность расчета параметров изоляции отдельных фаз сети. Осуществлен выбор инструментальных средств информационной системы непрерывного контроля сопротивлений изоляции.

Ключевые слова: изолированная нейтраль, токи утечки, метод добавочной проводимости, контроль сопротивлений изоляции.

Семинар № 23

Электрические сети с изолированной нейтралью трансформаторов широко применяются на участках шахт и рудников. Тяжелые условия эксплуатации таких сетей приводят к уменьшению сопротивлений изоляции и появлению опасных токов утечек на землю, которые могут привести к пожарам и взрывам и которые существенно снижают условия электробезопасности.

В шахтных сетях с изолированной нейтралью, как известно, из-за относительно больших значений емкостей фаз относительно земли, обеспечить безопасность эксплуатации без применения специальных мер защиты не представляется возможным [3, 5]. Речь идет о длительных допустимых уровнях напряжений и токов прикосновения, (по ГОСТ 12.1.038-82) как в нормальных, так и в аварийных режимах эксплуатации. В качестве одной из мер специальной защиты выступает контроль токов утечки и отключение сети при опасном их увели-

чении. Для этого необходимы средства для непрерывного контроля параметров изоляции сетей относительно земли, которые позволяют определять возможные токи утечки отдельных фаз на землю [4].

В настоящее время известно множество технических предложений и методов [1, 2, 3, 4, 5] определения параметров изоляции сетей с изолированной нейтралью, основным недостатком которых является невозможность непрерывного контроля параметров изоляции при рабочем напряжении сети или невозможность определения токов утечки отдельных фаз на землю.

Как показал анализ, наиболее приемлемым методом определения активных проводимостей и емкостей отдельных фаз относительно земли для непрерывного контроля параметров изоляции при рабочем напряжении сети и включенных токоприемниках является метод добавочной проводимости [6].

Суть метода состоит в определении напряжений отдельных фаз относительно земли в двух режимах: в обычном режиме эксплуатации и в режиме, когда в одну из фаз между землей и линейным проводом подключается добавочная проводимость (активная или емкостная). Полученные напряжения затем используются для расчета параметров изоляции отдельных фаз относительно земли [1].

Кроме громоздких вычислений, которые препятствовали практическому использованию этого метода, существенным недостатком его, как показали наши исследования, является большая погрешность расчетов, превышающая 40–60%. Недостатки метода могут быть принципиально преодолены путем использования устройств микропроцессорной техники для определения параметров изоляции. А разработка информационной системы непрерывного контроля токов утечки отдельных фаз электрических сетей с изолированной нейтралью позволит повысить их безопасную эксплуатацию.

Вообще электрическая сеть с изолированной нейтралью и сосредоточенными параметрами изоляции отдельных фаз может быть представлена моделью идеальной трехпроводной трехфазной цепи звезда–звезда рис. 1 [5]. Здесь представлены: вторичная обмотка силового трансформатора, токоприемники и эквивалентная сосредоточенная модель изоляции цепи отдельных фаз относительно земли.

Алгоритм расчета параметров изоляции состоит в определении напряжения смешения нейтрали (земли) по напряжениям отдельных фаз без добавочной проводимости и с добавочной проводимостью между линейным проводом одной из фаз и землей. После того как рассчитаны напряжения

смещения нейтрали, рассчитывается полная комплексная проводимость изоляции всех фаз сети относительно земли, где вещественная часть является суммарной активной проводимостью, а мнимая часть – суммарной реактивной проводимостью трехфазной сети относительно земли. Далее рассчитываются активные проводимости отдельных фаз в предположении одинаковости емкостей ($C_A = C_B = C_C$).[2]

Как известно [7], для повышения точности вычислений необходимо включать такое добавочное сопротивление, чтобы разница в показаниях вольтметра до и после подключения была не менее 10% фазного напряжения сети.

Для исследования погрешностей определения параметров изоляции отдельных фаз относительно земли использовалась следующая математическая модель.

Исходными данными является эквивалентная схема цепи рис.1 и измеренные напряжения:

U_a , U_b , U_c – величины напряжений фаз относительно земли без добавочной проводимости;

U'_a , U'_b , U'_c – величины напряжений фаз относительно земли с добавочной проводимостью;

U_Φ , U_π – соответственно, величины фазного и линейного напряжения сети.

Известной является также комплексная добавочная проводимость $Y_{\text{доб}}$ ($\sigma_{\text{доб}}$ или $j b_{\text{доб}}$).

Комплексные напряжения смешения нейтрали без (U_N) и с добавочной (U'_N) проводимостью определяются соотношениями:

$$\begin{aligned} U_N = a_N + jb_N &= \sqrt{U_b^2 - \frac{U_b^2 - U_c^2 + U_\pi^2}{2 \cdot U_\pi} -} \\ &- \frac{U_\pi}{2\sqrt{3}} + j \frac{U_b^2 - U_c^2}{2 \cdot U_\pi} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\underline{U}'_N = a'_N + jb'_N = \sqrt{\underline{U}'_b^2 - \frac{\underline{U}'_b^2 - \underline{U}'_c^2 + \underline{U}_L^2}{2 \cdot \underline{U}_L} - \frac{\underline{U}_L}{2\sqrt{3}} + j \frac{\underline{U}'_b^2 - \underline{U}'_c^2}{2 \cdot \underline{U}_L}} \quad (2)$$

Полная комплексная проводимость изоляции трех фаз относительно земли рассчитывается по формуле:

$$Y_S = g_\Sigma + jb_\Sigma = \underline{Y}_{\text{доб}} \cdot \frac{\underline{U}_\Phi - \underline{U}'_N}{\underline{U}'_N - \underline{U}_N} \quad (3)$$

Активные проводимости отдельных фаз вычисляются так:

$$\begin{aligned} g_A &= \frac{g_\Sigma + 2G1}{3}, & g_A &= \frac{g_\Sigma - G1 - G2}{3}, \\ g_A &= \frac{g_\Sigma - G1 + G2}{3}, \end{aligned} \quad (4)$$

где вспомогательные коэффициенты G1 и G2 равны

$$\begin{aligned} G1 &= \frac{g_\Sigma a_N - b_\Sigma b_N}{U_\Phi}, \\ G2 &= \sqrt{3} \frac{g_\Sigma b_N + b_\Sigma a_N}{U_\Phi}. \end{aligned} \quad (5)$$

Емкости изоляции фаз относительно земли можно определить по мнимой части полной комплексной проводимости (3)

$$C_A = C_B = C_C = C = \frac{b_\Sigma}{3\omega}.$$

На точность расчетов по (4) существенно влияют погрешности измерений фазных напряжений сети относительно земли. Поскольку измерений фазных напряжений шесть относительно земли, то возможны различные абсолютные погрешности Π для каждого из измеренных напряжений. Например, для напряжения U_a измерено $(U'_a - \Pi_a)$, а для напряжения U'_c измерено $(U'_c + \Pi_c)$, и т.д. (здесь U'_a и U'_c – истинные значения). Принимая для всех измерений наибольшую одинаковую абсолютную погрешность $\Pi = 2$ В, можно аналитически установить

сочетания знаков погрешностей ($+\Pi$ и $-\Pi$) для напряжений, при которых получается наибольшая ошибка расчетов по (4), то есть провести нормирование погрешности. Из 64 различных сочетаний знаков погрешностей для всех измеренных напряжений существуют наихудшие варианты, для которых ошибка расчетов наибольшая ($\geq 35\%$). Такая оценка погрешностей позволит принципиально установить применимость выбранного метода для расчета параметров изоляции отдельных фаз. Наихудшие варианты погрешностей расчета при подключении активной добавочной проводимости ($R_{\text{доб}} = 10$ кОм) к сети со следующими параметрами изоляции: $g_a = \frac{1}{30\text{k}\Omega}$,

$$g_b = \frac{1}{15\text{k}\Omega}, \text{ и}$$

$$g_c = \frac{1}{4.8\text{k}\Omega} \quad C_a = C_b = C_c = 0.5 \text{ мкФ},$$

приведены в табл. 1.

Как показал анализ, при подключении вместо активной реактивной добавочной проводимости получаются погрешности расчета не хуже, чем при активной ($\Delta g < 69\%$). Очевидно, что теоретическая погрешность недопустимо велика.

Для проверки аналитических результатов был проведен эксперимент. Для моделирования сопротивлений изоляции отдельных фаз сети относительно земли были использованы наборы резисторов (номиналы: 30 кОм, 15 кОм и 4.7 кОм), а так же для емкостей отдельных фаз на землю конденсаторы емкостью 0.5 мкФ, 1 мкФ и 2 мкФ. В качестве измерительных приборов для измерения фазных напряжений относительно земли и напряжений смещения нейтрали выступали обычные цифровые мультиметры UNI-T UT30B.

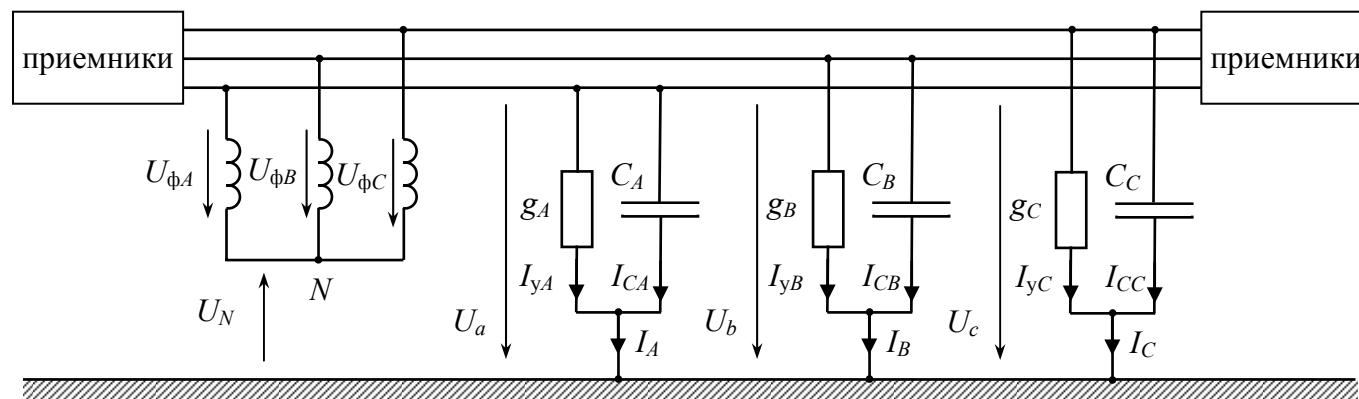


Рис. 1. Модель электрической сети с изолированной нейтралью трансформатора и осредоточенными параметрами изоляции отдельных фаз относительно земли

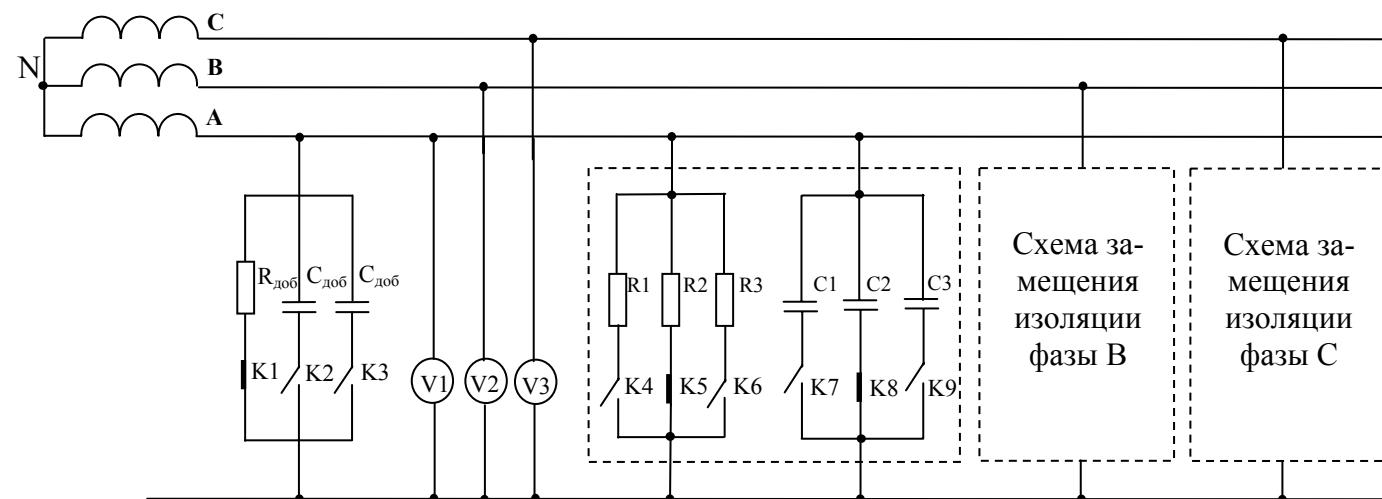


Рис. 2. Принципиальная схема эксперимента

Таблица 1
Оценка влияния абсолютной погрешности (Π) измерений напряжений на ошибку (Δg) расчета проводимостей отдельных фаз

№	Va	Vb	Vc	Va'	Vb'	Vc'	$\Delta g \%$
21	Ua- Π	Ub+ Π	Uc- Π	Ua'+ Π	Ub'- Π	Uc'- Π	-65.2
22	Ua- Π	Ub+ Π	Uc- Π	Ua'+ Π	Ub'- Π	Uc'+ Π	-69.5
23	Ua- Π	Ub+ Π	Uc- Π	Ua'+ Π	Ub'+ Π	Uc'- Π	-62.1
24	Ua- Π	Ub+ Π	Uc- Π	Ua'+ Π	Ub'+ Π	Uc'+ Π	-66.9
53	Ua+ Π	Ub+ Π	Uc- Π	Ua'+ Π	Ub'- Π	Uc'- Π	-41
54	Ua+ Π	Ub+ Π	Uc- Π	Ua'+ Π	Ub'- Π	Uc'+ Π	-44.1
55	Ua+ Π	Ub+ Π	Uc- Π	Ua'+ Π	Ub'+ Π	Uc'- Π	-38.9
56	Ua+ Π	Ub+ Π	Uc- Π	Ua'+ Π	Ub'+ Π	Uc'+ Π	-42.5

Таблица 2
Погрешности определения проводимостей изоляции отдельных фаз относительно земли при различных добавочных проводимостях (активной и реактивной) на физической модели

№ п- п	Добавочная проводимость в фазе «A»	Погрешности расчета проводимостей			Параметры изоляции отдельных фаз	Емкости отдельных фаз $C_a = C_b = C_c = C$
		$\Delta\gamma_{\alpha}\%$	$\Delta\gamma_{\beta}\%$	$\Delta\gamma_{\chi}\%$		
1	1 мкФ	6.06	37.0	– 17.06	$R_A = R1 = 30 \text{ кОм}$ $R_B = R2 = 15 \text{ кОм}$ $R_C = R3 = 4.7 \text{ кОм}$	$C = 0,5 \text{ мкФ}$
2	10 кОм	3.37	41.8	–8.30	$R_A = R1 = 15 \text{ кОм}$ $R_B = R2 = 15 \text{ кОм}$ $R_C = R3 = 4.7 \text{ кОм}$	
3	10 кОм	–2.61	13.41	4.53	$R_A = R1 = 15 \text{ кОм}$ $R_B = R2 = 15 \text{ кОм}$ $R_C = R3 = 15 \text{ кОм}$	
4	1 мкФ	–1.53	13.87	5.57	$R_A = R1 = 30 \text{ кОм}$ $R_B = R2 = 15 \text{ кОм}$ $R_C = R3 = 15 \text{ кОм}$	$C = 0.5 \text{ мкФ}$
5	10 кОм	16.2	21.3	14.3	$R_A = R1 = 30 \text{ кОм}$ $R_B = R2 = 15 \text{ кОм}$ $R_C = R3 = 15 \text{ кОм}$	
6	1 мкФ	3.00	16.9	7.50	$R_A = R1 = 30 \text{ кОм}$ $R_B = R2 = 15 \text{ кОм}$ $R_C = R3 = 15 \text{ кОм}$	$C = 0.5 \text{ мкФ}$

В качестве добавочной активной проводимости использовался резистор номиналом 10 кОм, а реактивной – конденсатор емкостью 0,5 мкФ и 1 мкФ. Схема установки представлена на рис. 2. В качестве трехфазного источника был использован лабораторный стенд ЭВ-4 с напряжением 220 В.

В испытаниях измерялись: напряжения фаз относительно земли, напряжение смещения нейтрали и линейное напряжение. Напряжения были измерены с добавочной проводимостью, (включалась в фазу A с наибольшим сопротивлением изоляции), и без неё.

По измеренным напряжениям были рассчитаны проводимости изоляции фаз по формулам (1) – (5), а затем

определенны относительные погрешности их расчета в процентах. Результаты представлены в табл. 2.

Как следует из таблицы, наибольшая погрешность определения проводимостей изоляции составляет 41,8%, что недопустимо много для практики.

При включении вместо активной добавочной проводимости реактивной результаты оказались примерно такими же. Поэтому наличие набора добавочных реактивных проводимостей в составе информационной системы не обязательно.

Для снижения ошибки расчета предлагается подключать добавочную проводимость поочередно к каждой из трех фаз – циклически к фазам A, B, C, A, B и т.д. При этом, как показали аналитические и эксперимен-

Таблица 3

Погрешности экспериментального определения проводимостей изоляции отдельных фаз относительно земли при поочередном подключении добавочной активной проводимости к различным фазам, имеющим неодинаковые сопротивления изоляции

№ пп	Добавочная проводимость к R_A	Погрешности расчета проводимостей			Параметры изоляции отдельных фаз	Емкости от- дельных фаз $C_a = C_b = C_c = C$
		$g_a, \%$	$g_b, \%$	$g_c, \%$		
1	10 кОм	4.2	-30	49.1	$R_A = R_2 = 15$ кОм $R_B = R_3 = 4.8$ кОм $R_C = R_1 = 30$ кОм	$C = 0,5$ мкФ
2	10 кОм	4.2	24.7	-12.7	$R_A = R_3 = 4.8$ кОм $R_B = R_1 = 30$ кОм $R_C = R_2 = 15$ кОм	$C = 0,5$ мкФ
3	10 кОм	9.7	28.5	-15.1	$R_A = R_1 = 30$ кОм $R_B = R_2 = 15$ кОм $R_C = R_3 = 4.7$ кОм	$C = 0,5$ мкФ

Таблица 4

Погрешности экспериментального определения проводимостей изоляции отдельных фаз относительно земли при поочередном подключении добавочной активной проводимости к различным фазам, имеющим одинаковые сопротивления изоляции в двух фазах

№ пп	Добавочная проводимость к R_A	Погрешности расчета проводимостей			Параметры изоляции отдельных фаз	Емкости от- дельных фаз $C_a = C_b = C_c = C$
		$g_a, \%$	$g_b, \%$	$g_c, \%$		
1	10 кОм	8.1	26.3	-5.6	$R_A = R_2 = 15$ кОм $R_B = R_1 = 30$ кОм $R_C = R_2 = 15$ кОм	$C = 0,5$ мкФ
2	10 кОм	5.9	1.9	26.9	$R_A = R_2 = 15$ кОм $R_B = R_2 = 15$ кОм $R_C = R_1 = 30$ кОм	$C = 0,5$ мкФ
3	10 кОм	16.2	21.3	14.3	$R_A = R_1 = 30$ кОм $R_B = R_2 = 15$ кОм $R_C = R_3 = 15$ кОм	$C = 0,5$ мкФ

тельные исследования, наименьшая погрешность определения проводимости изоляции оказывается в той фазе, к которой подключается добавочная активная проводимость (не превышает 11,5%). Результаты экспериментального определения погрешностей проводимостей изоляции при циклическом переключении добавочной проводимости приведены в табл. 3 и 4.

Из табл. 3 и 4 следует, что при циклическом подключении добавоч-

ной активной проводимости к фазам A, B, C, A и т.д. проводимость изоляции следует определять только в одной фазе, в той, к которой подключается добавочная проводимость. Например, во второй строке таблицы 3 погрешность определения сопротивления R_A (истинное значение равно $R_2 = 15$ кОм) составляет 4,2%. Во второй строке погрешность расчета R_A (истинное значение равно $R_3 = 4,8$ кОм) составляет 4,2%. Получается, что расчеты проводимостей изо-

ляции в фазе, к которой подключается добавочная активная проводимость, могут быть выполнены с погрешностью менее 10%, что вполне достаточно для практики. Заметим, что в эксперименте погрешность измерения напряжений фаз относительно земли составляла ± 1 В (один разряд на пределе измерения 200 В).

Как следует из табл. 4, при симметричных сопротивлениях изоляции в двух фазах (третья строка), погрешность расчета оказывается больше 10%, но все же находится в приемлемых для практики пределах.

На основании изложенного можно предложить такой алгоритм работы информационной системы (ИС) непрерывного контроля изоляции. Вначале измеряются напряжения фаз относительно земли без добавочной проводимости, для этого измеренные напряжения поступают на вход первичного преобразователя системы, затем сигнал поступает через гальваническую развязку на вход АЦП высокоскоростной архитектуры (параллельный АЦП (Flash), последовательного счета (Bit-Per-Stage)), после чего оцифрованный сигнал поступает на цифровой процессор обработки сигналов, далее результаты записываются в устройство хранения данных. Затем в одну из фаз включается добавочная проводимость, после чего вновь измеряются напряжения фаз, которые так же записываются в устройство хранения данных. Записанные данные обрабатываются по алгоритму (1)-(5) в решающем блоке, где вычисляются сопротивление изоляции только той фазы, к которой подключалась добавочная проводимость, и результат также записывается в память.

Следующий цикл измерения напряжений повторяется аналогично предыдущему, но при этом добавочная проводимость переключается в следующую фазу циклически (после

«А» к «В», после «В» к «С» и т.д.). Сопротивление изоляции рассчитывается для одной фазы и записываются в устройство хранения данных. Затем проводится еще одно измерение аналогично предыдущим, так же рассчитывается сопротивление изоляции, которое сохраняется в память. Полученные величины сопротивлений изоляции, хранящиеся в памяти, сравниваются с предельно допустимыми значениями (наименьшие допустимые) в соответствии с ГОСТ Р 52273 2004 и передаются на пульт дежурного в виде состояния (сопротивления) каждой отдельной фазы.

Поскольку контроль сопротивления изоляции непрерывный, то все последовательности действий повторяются непрерывно.

При подключении добавочной проводимости в одну из фаз необходимо учитывать её величину, чтобы не ухудшить сопротивление изоляции, в которую будет включена проводимость. Таким образом, добавочную проводимость желательно выбирать исходя из текущего состояния изоляции сети. Для этого необходимо использовать целый набор подобранных заранее активных и реактивных проводимостей для разных классов напряжений. При включенной добавочной проводимости не должны быть нарушены требования ГОСТ Р 52273 2004 «УСТРОЙСТВА ЗАЩИТЫ ОТ ТОКОВ УТЕЧКИ РУДНИЧНЫЕ ДЛЯ СЕТЕЙ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1200 В» в части допустимого активного сопротивления отдельных фаз на землю. Для активных проводимостей необходимо использовать набор сопротивлений в диапазоне от 6 кОм до 120 кОм. При этом удастся обеспечить для каждого номинального напряжения указанному в ГОСТ Р 52273 2004, допустимые сопротивления на землю (минимальное сопротиви-

ление срабатывания устройств защиты при симметричной трехфазной утечке).

Заключение

1. Для реализации общего алгоритма непрерывного контроля сопротивлений изоляции в составе ИС должно быть программируемое устройство обработки данных, которое с высокой точностью может установить линейное напряжение сети и напряжения фаз относительно земли без добавочной проводимости и с ней в одной из фаз, после чего рассчитать проводимости изоляции отдельных фаз по соотношениям (1 – 5) и устройство передачи результатов на пульт диспетчера (или дисплей в численной форме).

2. Аналитически удалось установить, что в результате нормирования погрешности максимальная погрешность расчета проводимостей составля-

ет 69% и является наихудшим вариантом из всех существующих для случайнym образом вносимых погрешностей в измеренные напряжения с добавочной проводимостью и без.

3. Работоспособность метода добавочной проводимости подтверждена в лабораторных условиях (экспериментально), где для измерения напряжений были использованы обычные мультиметры (*UNI-T UT30B*), при этом погрешность расчета проводимостей составляла от 3 до 60 %. Таким образом, для измерения напряжений необходимо использовать более точные вольтметры, а так же в алгоритме измерения системы непрерывного контроля сопротивления изоляции необходимо циклически переключать добавочную проводимость для обеспечения более точного определения параметров изоляции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабичев Ю.Е., Цапенко Е.Ф. Определение токов утечки отдельных фаз в шахтных сетях с изолированной нейтралью /В сб. научн. тр. XI Международной конференции "Электробезопасность"/, Вроцлав, Польша, 1997. сс.433-438
2. Бабичев Ю.Е., Алекссеев А.А. Влияние несимметрии параметров изоляции отдельных фаз относительно земли в сетях с изолированной нейтралью на токи утечек /В Сб. Электросбережение, электроснабжение электрооборудование./ Новомосковск, 1998. сс. 77-79
3. Бабичев Ю.Е., Хиврин М.В. Обеспечение безопасности эксплуатации рудничных электросетей напряжением до 1200 В /В сб. научн. Трудов ГИПРОУГЛЕАВТОМАТИЗАЦИЯ, "Автоматизация, управ-ление, безопасность, связь в угольной промышленности"/, Москва, 2003. сс.153-164
4. Дзюбан В.С. Взрывозащищенные аппараты низкого напряжения – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 240 с.
5. Цапенко Е.Ф. Сычев Л.И. Кулешов П.Н. Шахтные кабели и электробезопасность сетей. – 3-е изд.,- М.: Недра,1988. – 213 с.
6. Гладилин Л.В. Щуцкий В.И. Башев Ю.Г. Чеботаев Н.И. Электробезопасность в горнодобывающей промышленности. – М.: Недра, 1977, - 327 с.
7. Нагорных В.В. Разработка информационной системы непрерывного контроля изоляции электрических сетей с изолированной нейтралью напряжением до 1000 В. диплом МГГУ – М., 2007. ГИАБ

Коротко об авторах

Нагорных В.В. – аспирант кафедры Электротехники и информационных систем, Nagornykh@gmail.com.

Бабичев Ю.Е. – профессор кафедры Электротехники и информационных систем, доцент, кандидат технических наук, g_juri@mail.ru

Московский государственный горный университет, Moscow State Mining University, Russia, ud@msmu.ru