

З.А.ВОРОНИНА; О.Ю.ГЛЕБОВ; В.М.ЖИНЖИКОВ;
Г.М.КОЛИУШКО, канд.техн.наук; **И.Ю.ЛИНК;**
Д.Г.КОЛИУШКО, канд.техн.наук; **А.В. ПЛИЧКО**; НТУ «ХПИ»

ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ТОКА ПРИ ИЗМЕРЕНИИ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИКОСНОВЕНИЯ НА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИИ ЭНЕРГООБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА «КДЗ–1У»

Розглянуто вплив частоти вимірювального струму при вимірюванні напруги дотику. Показана залежність погрешності вимірів напруги дотику від частоти вимірювального струму. Запропонований графічний спосіб дозволяє, з використанням вимірювального комплексу «КДЗ–1У», підвищити точність визначення напруги дотику і якісно оцінити стан заземлюючих провідників.

Influence of measuring current frequency at measurement of a touch voltage is considered. Dependence of a touch voltage measurements error on measuring current frequency is analyzed. The graphic way allowing by use of a measuring complex «КДЗ–1У» to increase accuracy of touch voltage definition and qualitatively to estimate a condition of grounding conductors is offered.

Одним из основных факторов, характеризующих безопасность обслуживающего персонала электроустановок, является напряжение прикосновения. Согласно Правилам устройства электроустановок [1, п.1.7.23], *напряжением прикосновения называется напряжение между двумя точками цепи тока замыкания на землю (на корпус) при одновременном прикосновении к ним человека.*

Єдинственным нормативным документом, регламентующим порядок измерения напряжения прикосновения и действующим на территории Украины до января 2003 года, являлись временные методические указания [2], из которых методика измерения была перенесена в *ГНД 34.20.303–2003* [3].

В настоящее время наиболее распространенным в Украине для проведения диагностики состояния заземляющих устройств (ЗУ) является комплекс измерительный «КДЗ–1У», [4], в состав которого входит ГСТ – генератор синусоидального тока и ИМПН – измеритель напряжения и индикатор напряженности магнитного поля.

В соответствии с [3] напряжение прикосновения $U_{пр}$ определяется как:

$$U_{пр} = U_{изм} \frac{I_3}{I_{изм}}, \text{ В} \quad (1)$$

где I_3 – значение расчетного тока однофазного замыкания на землю, А;

$I_{изм}$ – измерительный ток, А;

$U_{изм}$ – напряжение прикосновения при протекании измерительного тока, В.

В работах [5, 6] указано, что погрешность определения напряжения

прикосновения зависит от ряда факторов:

- величины напряжения помехи промышленной частоты (50 Гц);
- распределения тока замыкания на землю по нейтралям силовых трансформаторов;
- частоты измерительного тока;
- амплитуды измерительного тока;
- горизонтальной неоднородности верхнего слоя грунта в зоне обслуживания оборудования;
- горизонтальной неоднородности плотности измерительного тока, растекающегося по грунту в зоне обслуживания;
- сезонных колебаний удельного сопротивления грунта.

Целью настоящей статьи является анализ влияния частоты измерительного тока при измерении напряжения прикосновения на оборудовании электроэнергетических объектов с использованием измерительного комплекса «КДЗ–1У». Это обусловлено тем, что, для уменьшения влияния электромагнитных помех промышленной частоты, измерения выполняются при протекании измерительного тока, частота которого отлична от 50 Гц. Это в равной степени относится как к комплексу «КДЗ–1У», так и к другим приборам, предназначенным для измерения напряжения прикосновения (ПИНП, ЭКО–200, ОНП–1 и др.).

Известно, что частота измерительного тока определяет значение полного сопротивления ($Z_0 = R_0 + jX_0$) заземляющих проводников и заземлителей, а индуктивная составляющая этого сопротивления (X_0) определяет характер зависимости напряжения прикосновения от частоты измерительного тока. Для иллюстрации данной зависимости приведем результаты измерений напряжений прикосновения (см. табл. 1) для разъединителей ОРУ–330 кВ и ОРУ–110 кВ одной из подстанций НЭК «Укрэнерго». Измерение напряжения прикосновения выполнялось между потенциальным электродом, расположенным в месте обслуживания разъединителя, и металлическим шкафом привода, установленного на металлоконструкции разъединителя. Измерительный ток протекал по электрической цепи между заземленной металлоконструкцией разъединителя и заземленной нейтралью одного из автотрансформаторов подстанции. Приведенные в табл. 1 данные подтверждают, что при повышении частоты измерительного тока возрастает величина измеряемого напряжения.

В работе [7] проведен теоретический анализ влияния частоты измерительного тока на величину напряжения прикосновения и сопротивления растеканию тока замыкания на землю в диапазоне частот от 50 Гц до 1000 Гц. В работе показано, что в обозначенном диапазоне частот основную погрешность в определении величины напряжения прикосновения вносит только зависимость индуктивной составляющей продольного сопротивления заземляющего проводника от частоты измерительного тока. Характер зависимости величины сопротивления растекания тока замыкания на землю (Z_p) и напря-

жения прикосновения ($U_{\text{ПР}}$) определяется следующими выражениями:

$$Z_{P_{50}} = \sqrt{\left[\sqrt{Z_{P_{\text{ИЗМ}}}^2 - X_{0_{\text{ИЗМ}}}^2} \cdot l^2 - (R_{0_{\text{ИЗМ}}} - R_{0_{50}}) \cdot l \right]^2 + X_{0_{50}}^2 \cdot l^2}; \quad (2)$$

$$U_{\text{ПР}} = U_{\text{ИЗМ}} \cdot \frac{I_3}{I_{\text{ИЗМ}}} \cdot \frac{Z_{P_{50}}}{Z_{P_{\text{ИЗМ}}}}, \quad (3)$$

где индекс *ИЗМ* относится к частоте измерительного тока, а индекс *50* – относится к промышленной частоте.

Таблица 1

№ п/п	Наименование оборудования	Напряжение прикосновения $U_{\text{ИЗМ}}$, мВ, измеренное при протекании измерительного тока величиной $I_{\text{ИЗМ}} = 4,57$ А и частотой $f_{\text{ИЗМ}}$, Гц		
		57	211	419
1	ОРУ–330 кВ Ячейка №2, ШР–IV В–2, ф.А	15,6	31,4	46,7
2	ОРУ–330 кВ Ячейка №2, ШР–IV В–2, ф.С	14,1	27,8	43,9
3	ОРУ–330 кВ Ячейка №4, ШР–III В–1, ф.А	13,6	24,0	37,3
4	ОРУ–330 кВ Ячейка №4, ШР–III В–1, ф.С	11,1	21,2	32,9
5	ОРУ–330 кВ Ячейка №6, ШР–IV В–2, ф.А	13,5	27,2	38,8
6	ОРУ–330 кВ Ячейка №6, ШР–IV В–2, ф.С	14,9	26,6	39,8
7	ОРУ–110 кВ Ячейка №4, ШР–I	34,9	76,1	122,0
8	ОРУ–110 кВ Ячейка №6, ШР–I	34,6	80,2	129,0
9	ОРУ–110 кВ Ячейка №7, ШР–I	36,8	79,9	129,0
10	ОРУ–110 кВ Ячейка №8, ШР–I	44,6	99,8	160,0
11	ОРУ–110 кВ Ячейка №9, ШР–I	34,2	73,2	115,0
12	ОРУ–110 кВ Ячейка №10, ШР–I	38,9	82,6	131,0

Для проведения пересчета в работе [7] рассчитаны значения удельного продольного сопротивления \dot{Z}_0 стальных проводников различных сечений для частот от 50 до 1000 Гц. Таким образом, выполнив измерение величин $U_{\text{ИЗМ}}$, $I_{\text{ИЗМ}}$, $Z_{P_{\text{ИЗМ}}}$, а также – по исполнительной схеме ЗУ (при наличии) – длины заземляющих проводников l , можно, воспользовавшись выражениями (2) и (3) и рассчитанными значениями удельного продольного сопротивления \dot{Z}_0 , выполнить пересчет значений $Z_{P_{\text{ИЗМ}}}$ и $U_{\text{ИЗМ}}$ к промышленной частоте.

Предложенная в работе [7] методика определения $U_{\text{ПР}}$ является, на первый взгляд, достаточно простой и удобной для применения в инженерной практике. Однако, для определения $U_{\text{ПР}}$ в обязательном порядке необходимо измерять Z_P , что само по себе на действующем объекте, а особенно в условиях городской застройки (даже при наличии возможности организовать токо-

вую цепь), выполнить корректно является весьма сложной и трудоемкой задачей [8], а кроме того требуются дополнительные устройства для определения реактивной составляющей продольного сопротивления.

Поэтому определить влияние $f_{ИЗМ}$ на величину $U_{ПР}$ предлагается графическим способом. Для этого необходимо выполнить измерение только величины $U_{ИЗМ}$, но на трех частотах, отличных от промышленной. В комплексе КДЗ–1У для этих целей применяются, как видно из табл. 1, частоты 57 Гц, 211 Гц и 419 Гц. Построив по полученным данным кривые зависимости $U_{ИЗМ}(f_{ИЗМ})$ и выполнив их экстраполяцию до промышленной частоты, получим величины U_{50} , подставив которые в выражение (1), можно определить величины $U_{ПР}$.

Для иллюстрации предложенного графического способа приведем результаты расчетов (см. рисунок и табл. 2) для тех же разъединителей. Величину нормирующего коэффициента, обусловленную зависимостью $U_{ПР}$ от частоты измерительного тока $f_{ИЗМ}$, определим из следующего выражения:

$$K_H = \frac{U_{50} - U_{ИЗМ}}{U_{50}}. \quad (4)$$

Измерения, результаты которых приведены в данной статье, выполнялись на последнем этапе диагностики состояния ЗУ подстанции. Анализ исполнительной схемы показал, что:

а) ЗУ ОРУ–110 кВ и ЗУ ОРУ–330 кВ представляют собой достаточно равномерную сетку, особенно в тех областях, в которых установлены рассматриваемые разъединители;

б) нейтраль упомянутого выше автотрансформатора присоединена к сетке ЗУ ОРУ–330 кВ заземлителем длиной 14 м, а к сетке ЗУ ОРУ–110 кВ – заземлителем длиной 36 м;

в) металлоконструкции рассматриваемых разъединителей присоединены к ЗУ заземляющими проводниками длиной менее 1,5 м.

Сопоставим приведенные результаты диагностики состояния ЗУ с кривыми рисунка.

Из рисунка видно, что имеет место ярко выраженное разделение кривых на две группы, причем по признаку принадлежности к соответствующему ОРУ. При этом, кривые, относящиеся к ОРУ–330 кВ, имеют меньший наклон, чем кривые, относящиеся к ОРУ–110 кВ. Таким образом, чем больше длина (а значит и Z_0) заземлителей, присоединяющих нейтраль автотрансформатора к ЗУ соответствующего ОРУ, тем больше $U_{ПР}$, обусловленное протеканием тока I_3 через данную нейтраль. Следовательно, предложенный способ позволяет не только уточнить значения $U_{ПР}$, но и качественно оценить состояние заземлителей, присоединяющих нейтраль автотрансформаторов к соответствующим ОРУ.

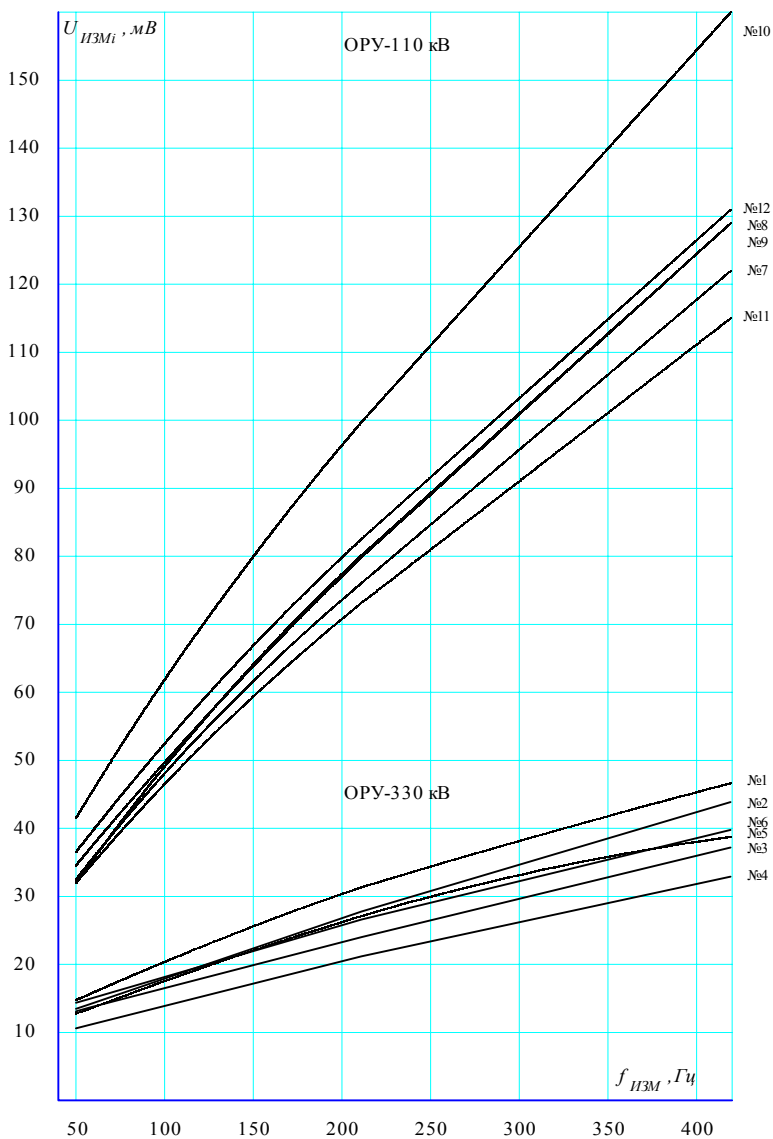
Следует также заметить, что кривая $U_{ИЗМ}(f_{ИЗМ})$ разъединителя ОРУ–110

кВ Ячейка №8, ШР–I (№10) выделяется из группы кривых (ее наклон больше остальных), относящихся к данному ОРУ. Поскольку заземляющие проводники разъединителей данной группы имеют практически одинаковую геометрию, то на наклон кривой $U_{ИЗМ}$ ($f_{ИЗМ}$) указанного разъединителя оказывают влияние либо Z_0 заземляющего проводника данного разъединителя, либо Z_0 связи шкафа привода разъединителя с его металлоконструкции, либо Z_0 связи металлоконструкции с заземляющим его проводником. Следовательно, предложенный способ позволяет также качественно оценить состояние соответствующих связей, причем на более высоких частотах эта оценка более четко выражена.

Таблица 2

№ п/п	Наименование оборудования	Напряжение прикосновения U_{50} , мВ, полученное экстраполяцией графиков $U_{ИЗМ}$ ($f_{ИЗМ}$)	Нормирующий коэффициент K_n при протекании измерительного тока величиной $I_{ИЗМ} = 4,57$ А и частотой $f_{ИЗМ}$, Гц		
			57	211	419
1	ОРУ–330 кВ Ячейка №2, ШР–IV В–2, ф.А	14,8	–0,054	–1,122	–2,155
2	ОРУ–330 кВ Ячейка №2, ШР–IV В–2, ф.С	13,5	–0,044	–1,059	–2,252
3	ОРУ–330 кВ Ячейка №4, ШР–III В–1, ф.А	13,1	–0,038	–0,832	–1,847
4	ОРУ–330 кВ Ячейка №4, ШР–III В–1, ф.С	10,6	–0,047	–1,000	–2,104
5	ОРУ–330 кВ Ячейка №6, ШР–IV В–2, ф.А	12,8	–0,055	–1,125	–2,031
6	ОРУ–330 кВ Ячейка №6, ШР–IV В–2, ф.С	14,4	–0,035	–0,847	–1,764
7	ОРУ–110 кВ Ячейка №4, ШР–I	32,5	–0,074	–1,342	–2,754
8	ОРУ–110 кВ Ячейка №6, ШР–I	32,2	–0,075	–1,491	–3,006
9	ОРУ–110 кВ Ячейка №7, ШР–I	34,6	–0,064	–1,309	–2,728
10	ОРУ–110 кВ Ячейка №8, ШР–I	41,6	–0,072	–1,399	–2,846
11	ОРУ–110 кВ Ячейка №9, ШР–I	32,0	–0,069	–1,288	–2,594
12	ОРУ–110 кВ Ячейка №10, ШР–I	36,6	–0,063	–1,257	–2,579

Кроме того, анализ результатов расчета, приведенных в табл. 2, показывает, что измерение напряжения прикосновения на частоте 57 Гц приводит к появлению методической погрешности, не превышающей 10 %.



Зависимость напряжения прикосновения от частоты измерительного тока $U_{ИЗМ}(f_{ИЗМ})$

Предложенный графический способ позволяет учитывать зависимость напряжения прикосновения от частоты измерительного тока, что повышает точность определения напряжения прикосновения и снижает затраты на реконструкцию (ремонт) ЗУ.

Список литературы: 1. Правила устройства электроустановок / Минэнерго П68 го СССР. – М.: Энергоатомиздат, 1987, – 648 с. 2. Временные методические указания по измерениям электрических характеристик заземляющих устройств распределительных устройств и трансформаторных подстанций переменного тока напряжением выше 1000 В с глухим заземлением нейтрали, спроектированных по нормам на напряжение прикосновения / Инфорэнерго. – М.: 1978. 3. ГНД 34.20.303–2003. Випробування та контроль стану заземлювальних пристроїв електроустановок. 4. Богатырев И.Н., Доценко В.И., Недзельский О.С., Понуждаева Е.Г., Фоменко В.Г. Модернизированный измерительный комплекс «КДЗ–1У». // Вестник НТУ «ХПИ». – Харьков: НТУ «ХПИ». – Вып. 17. – 2006. – С. 15-18. 5. Вытришко В.В., Глебов О.Ю., Доценко В.И., Жинжиков В.М., Кащев А.В., Колушко Г.М., Колушко Д.Г., Линк И.Ю. Влияние электромагнитных помех промышленной частоты при измерении напряжения прикосновения на электрооборудовании подстанций при помощи комплекса КДЗ–1. Вторая Российская конференция по заземляющим устройствам: Сборник докладов / Под ред. Ю.В.Целебровского. – Новосибирск: Сибирская энергетическая академия, 2005. – С. 189-198. 6. Глебов О.Ю., Колушко Д.Г., Линк И.Ю. Определение напряжения прикосновения методом суперпозиции составляющих тока однофазного замыкания на землю. // Вестник НТУ «ХПИ». – Харьков: НТУ «ХПИ». – Вып. 49. – 2005. – С. 85 – 88. 7. Горшков А.В. Анализ состояния находящихся в эксплуатации заземляющих устройств с точки зрения требований электробезопасности и термической стойкости кабелей вторичных цепей: Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.26.01 / МЭИ – М., 1999, – 20 с. 8. Борисов Р.К., Горшков А.В., Дворников Б.П., Жарков Ю.В. Диагностика заземляющих устройств. Вторая Российская конференция по заземляющим устройствам: Сборник докладов / Под ред. Ю.В.Целебровского. – Новосибирск: Сибирская энергетическая академия, 2005. – С. 175-178.

Поступила в редколлегию 27.10.2006.