

Об измерении полного сопротивления петли «фаза-ноль» и определении токов короткого замыкания

Борисов Р.К., Жуликов С.С., Кокорин С.А., Смирнов М.Н.

Измерение полного сопротивления петли «фаза-ноль» должно выполняться в соответствии с ПТЭЭП и ГОСТ Р 50571.16-99 при проведении приемо-сдаточных испытаний и в процессе эксплуатации в системах электроснабжения (СЭ) 0,4 кВ.

По результатам измерений сопротивления рассчитываются токи короткого замыкания (КЗ). Данные о токах КЗ используются для определения чувствительности защиты от сверхтоков (токов перегрузки и токов КЗ); термической стойкости кабельных линий (в том числе воздушных); невозгораемости кабельных линий; селективности (избирательности) действия защиты от сверхтоков.

Для измерения сопротивления петли «фаза-ноль» для системы TN могут быть приняты следующие методы: измерение сопротивления петли «фаза-ноль» способом падения напряжения (метод активного двухполюсника) и при помощи отдельного источника питания.

Все предлагаемые на рынке приборы используют для измерений полного сопротивления петли «фаза-ноль» способ падения напряжения (рис.1).

Напряжение в испытываемой цепи измеряют с включенным и отключенным сопротивлением нагрузки, и сопротивление петли «фаза-ноль» рассчитывают по формуле:

$$Z = \frac{U_1 - U_2}{I_R}$$

где Z - полное сопротивление петли «фаза-ноль», Ом;

U_1 - напряжение, измеренное при отключенном сопротивлении R_n , В;

U_2 - напряжение, измеренное при включенном сопротивлении R_n , В;

I_R - ток, протекающий через сопротивление R_n , А.

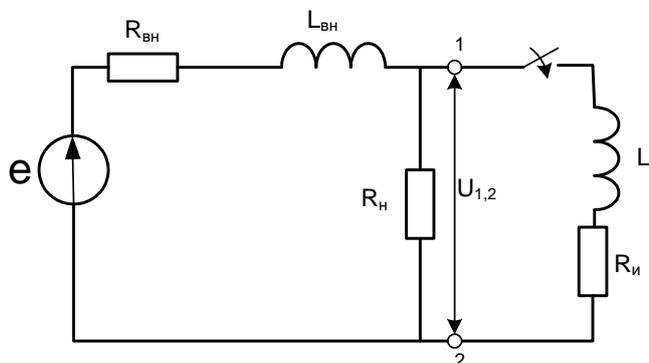


Рис.1. Схема измерения сопротивления петли «фаза-ноль»

По измеренному сопротивлению производится расчет тока КЗ.

Для проверки были проведены контрольные измерения на нескольких объектах приборами различных фирм (отечественных и зарубежных) наиболее часто применяемыми организациями, занимающимися электроналадочными работами. В таблице указаны приборы, которые использовались в экспериментах, и их основные характеристики.

№ п/п	Название прибора	Производитель	Измеряемые и рассчитываемые параметры	Диапазон измерений, погрешность
1	Многофункциональный тестер электроустановок Fluke 1653	«Fluke Corporation», США и Нидерланды	Напряжения сети (переменное, 50/60 Гц)	Диапазон: 100÷500 В, погрешность: ± (0,8% + 3 знака)
			Полное сопротивления контура	Диапазон/разрешение: 2000 Ом/0,01 Ом
			Вычисление: ожидаемый ток короткого замыкания	Диапазон: 0÷25 кА, погрешность: определяется измерениями погрешности сопротивления контура и сетевого напряжения
2	Измеритель параметров электроустановок Metrel MI 3102H	METREL d.d., Словения	Напряжения сети (переменное, 45÷65 Гц)	Диапазон: 100÷264 В
			Активное сопротивление петли короткого замыкания	Диапазон: 0,24...2000 Ом, погрешность: ±0,05xZ _{L00PBM} +5 ед. мл. р.) Тестирующий ток 7,5А, время протекания тока 10÷15 мс
			Расчётное значение ожидаемого тока короткого замыкания	Диапазон: 0÷24,4кА, погрешность: вычисляется исходя из основной погрешности измерения сопротивления петли короткого замыкания
3	Измеритель параметров цепей фаза-ноль и фаза-фаза MZC-200	SONEL, Польша	Измерение напряжения переменного тока 50/60 Гц	Диапазон: 0÷440 В, погрешность: (2%и.в.+2ед.мл.раз-ряда)
			Активное сопротивление петли короткого замыкания.	Диапазон: 0,24...2000 Ом. Время протекания измерительного тока 10 мс.
			Расчётное значение ожидаемого тока короткого замыкания для номинального напряжения сети	Диапазон отображения ожидаемого тока короткого замыкания: 1,15 А...9,99 А 10,0 А...99,9 А 100 А...999 А 1,00 кА...9,99 кА 10,0 кА...40 кА, погрешность: вычисляется исходя из основной погрешности измерения сопротивления петли короткого замыкания.
4	Измеритель параметров электробезопасности Kyoritsu KEW 6011	KYORITSU ELECTRICAL INSTRUMENTS WORKS, LTD, Япония;	Напряжение сети(переменное, 50/60 Гц)	Диапазон: 110÷260В, погрешность: ±2%rdg ±4dgt
			Расчётное значение ожидаемого тока короткого замыкания	Диапазон: 200А (2,3А 40мс) 2000А (25А 20мс) 20кА (25А 20мс)
5	Прибор для измерений параметров электросетей «ВЕКТОР»	ООО НПФ-МИЭЭ, Россия	Напряжения сети (переменное, частотой 50 Гц),	Диапазон: 120÷250 В, погрешность измерения напряжения: 2%.
			Модуль комплексного сопротивления петли фаза-ноль	Диапазон: 0,07÷5 Ом, погрешность: 5%. При тестирующем токе 22А два периода тока, частотой 50 Гц
			Угол сдвига между током и напряжением.	Диапазон: 0÷90 град., погрешность измерения: ±2 град.
			Вычисляемое значение тока короткого замыкания	Диапазон: 44÷3100 А, погрешность значения тока КЗ: 5 %
6	Устройство для проверки характеристик автоматических выключателей «Сатурн - 1М»	ЗАО «РАДИУС Автоматика», Россия	Оценка тока короткого замыкания (КЗ) цепи фаза—ноль присоединений 380 В и тока КЗ на шинах 380 В.	Пределы основной приведенной погрешности измерений силы тока во всех диапазонах измерения при времени измерения не менее 0,02с ± (1,5 + 3 ед. мл. разр.) ±(1,5 + погрешность ТТ+ 3 ед. мл. разр.)
7	Устройство для тестирования сетей постоянного и переменного тока УИН-3	ООО «Компания ЭМС», Россия	Напряжения сети (переменное/ постоянное),	Диапазон: 120÷250 В, погрешность измерения напряжения: 1%.
			Модуль комплексного сопротивления петли фаза-ноль	Диапазон: 0,01÷5 Ом, погрешность измерения: 5%. Тестирующий ток 50÷1400 А два периода тока, частотой 50 Гц
			Угол сдвига между током и напряжением.	Диапазон : 0÷90 град., погрешность измерения ±2 град.
			Вычисляемое значение тока короткого замыкания	Диапазон: 44÷24000 А Погрешность значения тока КЗ: 5 %

Все применяемые приборы проходили метрологическую поверку. Измерения выпол-

нялись строго в соответствии с указаниями в Руководстве по эксплуатации.

Сравнительные измерения различными приборами проводились: на одной из секций ГРЩ автоматической телефонной станции ОАО «МГТС»; в электрощитовой кафедры ТЭВН НИУ МЭИ и в розетках потребителей.

Были проведены измерения также на одном из фидеров, отходящем от электрощитовой. В точке измерений затем устраивалось искусственное КЗ и измерялся ток КЗ.

При проведении измерений указанными приборами осуществлялась регистрация токов и напряжений с помощью осциллографа Fluke 199. Для регистрации токов применялись токовые клещи. В экспериментах с искусственным КЗ ток регистрировался с токового шунта.

При измерениях на одной из секций ГРЩ автоматической телефонной станции ОАО «МГТС» были получены следующие значения тока КЗ измеренные различными приборами:

- устройством «Сатурн-М1» - 2,5 кА;
- «Fluke-1653» - 1,4 кА;
- «Kyoritsy 6011A» - 1,1 кА;
- «УИН-3» при токе тестирования 330 А - 4,03 кА, а при токе тестирования 470 А - 4,25 кА.

Значение тока КЗ, рассчитанное по осциллограммам (рис.2) при использовании устройства «УИН-3» - 4,3 кА.

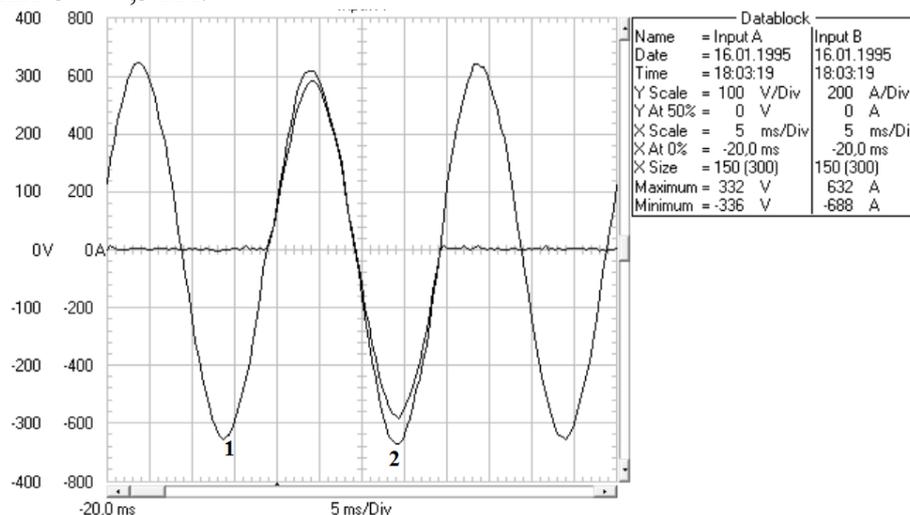


Рис. 2 Осциллограммы тока (2) и напряжения (1) при измерении тока КЗ устройством «УИН-3» при использовании 14 ключей ($I_{\text{тест.}} = 616 \text{ А}$)

Расчётное значение тока КЗ на шинах ГРЩ, определённое по программе *GuSetsAC* «Расчет КЗ в электроустановках переменного тока напряжением 0,4 кВ» (имеет регистрацию в Роспатенте), составляет 4,2 кА.

При измерениях в электрощитовой кафедры ТЭВН НИУ МЭИ были получены следующие значения тока КЗ измеренные различными приборами:

- «MZC-200» - 0,95 кА;
- «MI-3102H CL» - 1,65 кА;
- «Сатурн - 1М» - 2,65 кА;
- «Fluke-1653» - 1,2÷1,4 кА;
- «УИН-3» при разных токах тестирования: 50 А - 2,15 кА, 400 А - 3,2 кА, 600 А - 2,95 кА;
- «ВЕКТОР» - 3,1 кА.

Измеренное значение тока КЗ «Fluke-1653» - 1,2÷1,4 кА.

На одном из фидеров выполненным проводом ПВЗ 2x10 длиной 16 м с автоматом АВВ Tmax T1B160А в начале и АП50Б в конце линии было устроено искусственное КЗ. Измерение тока КЗ проводилось по осциллограмме напряжения на калиброванном токовом шунте 0,00025Ом. Эксперименты повторялись 5 раз. Среднее значение тока КЗ получилось равным 1920 А.

Предварительные измерения сопротивления петли «фаза-ноль» проводились приборами Fluke-1653 и УИН-3. По результатам измерений были получены следующие значения:

- Fluke-1653: сопротивление $0,32 \div 0,38$ Ом, а ток КЗ $635 \div 750$ А;
- УИН-3 при различном токе тестирования: при 90 А ток КЗ 2730 А, при 200 А ток КЗ 2270 А, при 400 А ток КЗ 1980 А, при 500 А 1990 А.

При измерениях в розетках были получены следующие значения токов КЗ:

- «MЗC-200» - $316 \div 333$ А;
- «MI-3102H CL» - 422 А;
- «Сатурн - 1М» - 600 А;
- «Fluke-1653» - 350 А.

Результаты измерений «УИН-3» сопротивления ($R_{\text{И}}$) и тока КЗ при разных токах тестирования представлены на рис. 3.

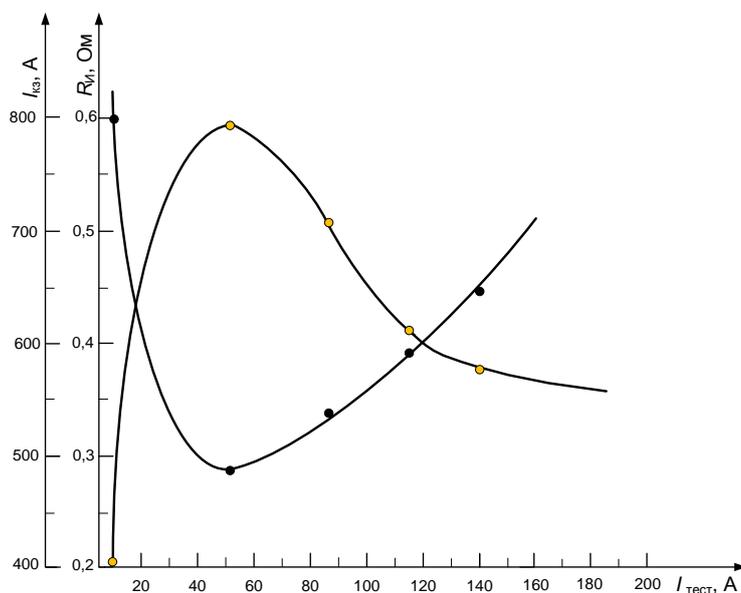


Рис.3 Результаты измерений при различных токах тестирования

Проведенные эксперименты показали, что сомнения в результатах измерений сопротивления петли «фаза-ноль» и определения тока КЗ приборами различных производителей были правомерны.

Некоторые представители фирм производителей приборов отмечают, что при измерениях важно определять именно полное сопротивление: активную и индуктивную составляющую. У отдельных приборов в результате измерений определяется и выводится на табло угол сдвига между током и напряжением при тестирующем токе.

Рассмотрим, при каких условиях измерение угла сдвига между током и напряжением, а, следовательно, и определение активного и индуктивного (полного) сопротивления необходимо обязательно измерять.

На рис.4 представлены зависимости отношения реального тока КЗ ($I_{\text{кз}}$) к рассчитанному по сопротивлению петли «фаза-ноль» ($I_{\text{пр}}$) при измерениях от отношения активного

и индуктивного сопротивлений ($R_{\text{и}}/x_{\text{вн}}+x_{\text{и}}$) для различных значений отношения $R_{\text{вн}}/x_{\text{вн}}$ (выделено цветом).

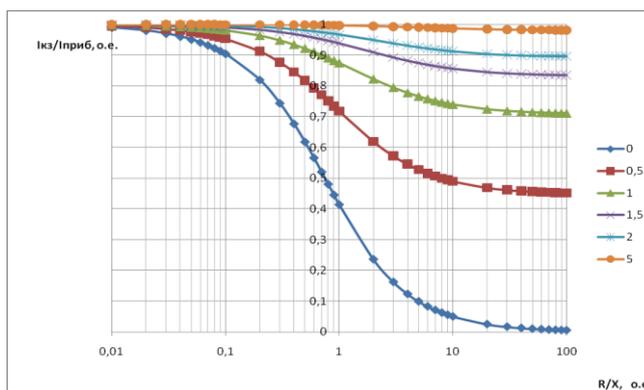


Рис. 4 Зависимость погрешности в определении тока КЗ при замене полного сопротивления на активное

Эти зависимости показывают, какая погрешность будет в расчетах токов КЗ по измеренному сопротивлению, если не учитывать угол сдвига между током и напряжением, т.е. при замене полного сопротивления чисто активным. При $R_{\text{вн}}/x_{\text{вн}}$ больше 1 погрешность не превышает 30%. Такое соотношение характерно для точек измерения, удаленных от источника, при относительно небольших токах КЗ. Вблизи источника (трансформатора) погрешность в определении тока КЗ может быть очень большая. При этом расчетное значение тока КЗ будет больше, чем реальный ток КЗ. Результаты измерений в розетках подтверждают это утверждение: токи КЗ у всех приборов примерно одинаковые.

Если не учитывается угол сдвига между напряжением и током, то прибор будет показывать завышенное значение тока КЗ. Погрешность тем больше, чем больше реактивная составляющая в полном сопротивлении.

Все приборы зарубежных производителей и большинство отечественных работают с тестирующим током примерно 10÷20 А. Из литературы известно, что сопротивление контактов зависит от тока (рис.5), причем наиболее сильно зависимость проявляется до значения тока 50÷100 А.

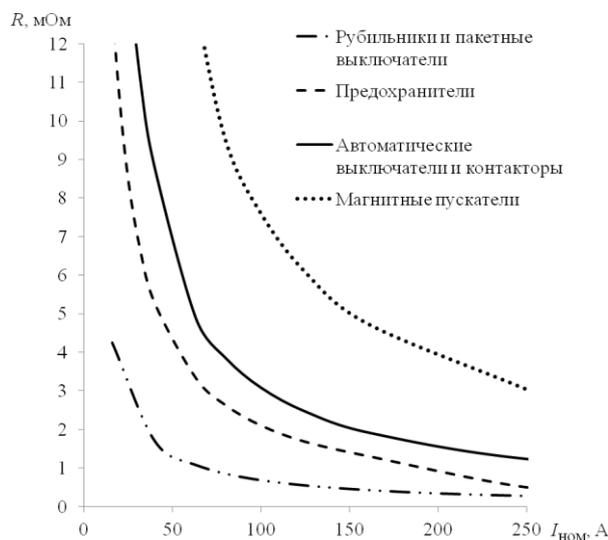


Рис.5 Графики зависимости сопротивлений коммутационных и защитных аппаратов от тока в цепи

Окисная пленка и неметаллические включения контактов обуславливают нелинейную зависимость переходного сопротивления от протекающего тока. В связи с этим наиболее достоверные измерения будут при приближении тестирующего тока к рабочему току контактов. **Приборы с малым тестирующим током дают завышенные показания сопротивления контактов.** В стандарте МЭК 56, регламентирующем значение измерительного тока приборов для измерения сопротивления контактов, установлено минимально допустимое значение тока в 50 А. Нестабильность тестирующего тока вызывает дополнительную погрешность измерения сопротивления, пропорциональную изменению индуктивности цепи и тока за время измерения.

Все приборы фактически измеряют напряжение до и после подключения определенного сопротивления. Сопротивление петли «фаза-нуль» и ток КЗ вычисляются по разности напряжений. В литературе указывается на то, что при измерении полного сопротивления петли «фаза-нуль» разница между U_1 и U_2 должна быть значительной. В противном случае разница напряжений соизмерима с погрешностью измерения напряжения. При малых токах тестирования эта разница в измеренных напряжениях не может быть значительной, если истинное сопротивление петли «фаза-нуль» мало. Некоторые зарубежные производители (например, METREL d.d., Словения) указывают, что для расчета тока КЗ необходимо вводить масштабный коэффициент, который надо устанавливать в приборе при измерениях. Значение этого коэффициента не дается, ссылаясь, что в разных странах он разный. При тестирующем токе не более 10 А можно рассчитывать, что относительно точно может быть определен ток КЗ не более 1 кА, а при 20А – не более 2кА.

Таким образом, погрешность в измерениях и определении тока КЗ, если реальные токи КЗ более 2кА, связана с тем, что токи тестирования в приборах составляют в основном 10-20 А.

Проведенные эксперименты и анализ методики измерений сопротивления петли «фаза-нуль» и определения токов КЗ показали следующее:

1. Применение приборов с тестирующими токами 10-20А ограничено, как правило, групповыми распределительными щитками. В иных случаях (ВРУ, ГРШ и т.п.) получаются существенно заниженные значения токов КЗ.
2. Отсутствие функции измерения угла сдвига фаз может приводить к существенной погрешности при определении тока КЗ.
3. Если измерения тока КЗ выполнены неверно (значения тока КЗ занижены), то чувствительность защиты, как правило, будет обеспечена. Но селективность по току может не обеспечиваться: две или более ступеней защиты могут оказаться в общей зоне КЗ, и разнести их уставки по току не представляется возможным. Может сработать предыдущая ступень защиты и отключить целый ряд достаточно ответственных потребителей. Выбор параметров (а именно, уставок по току КЗ) автоматических выключателей защиты отходящих от ВРУ (ГРЩ, ЩСН) фидеров существенно затруднен и приводит к необходимости принятия нестандартных проектных решений, которые к тому же не всегда могут быть реализованы.