

## Петлевой метод для силовых кабелей

При аварии на силовом кабеле для предварительной локализации зоны повреждения проводят измерения расстояния до места повреждения. Эти измерения можно разделить на две группы: локализация рефлектометром и измерения на постоянном токе. К последним относится петлевой метод.

Наиболее часто используются рефлектометрические измерения, однако в чистом виде с помощью рефлектометра удается локализовать повреждения с переходным сопротивлением до 100 Ом. Для поиска более высокоомных дефектов необходимо дополнительно использовать высоковольтную аппаратуру с целью прожига, удержания дуги или генерации стоячей волны. Ситуация осложняется неопределенностью коэффициента укорочения конкретного кабеля, большим затуханием и дисперсией высокочастотных сигналов.

Петлевой метод считается трудоемким, но способным обнаружить замыкания с переходным сопротивлением до нескольких десятков кОм. Трудоемкость зависит от фазности замыкания и используемой аппаратуры. Во многих случаях при однофазном повреждении и соответствующем аппаратном обеспечении петлевой метод может быть простым и эффективным.

## АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

---

Любой метод измерений нуждается в аппаратной реализации. Для кабелей связи существовал мост постоянного тока с ручным уравниванием типа ПКП-5. Более современные электронные приборы с автоматическими функциями принципиально упростили измерительную процедуру и полностью вытеснили простые мосты.

Для энергетических кабелей аппаратная поддержка застряла на уровне прошлого века. В продаже можно найти всего два отечественных прибора. Это мосты типа М333 и М333-М1. Именно этими приборами рекомендуется пользоваться для реализации петлевого метода. Указанные мосты могут использоваться как хорошие магазины сопротивлений, но в качестве современной аппаратной поддержки петлевого метода они, увы, безнадежны. От измерителя требуется очень высокая квалификация и зоркий глаз. Для связанных кабелей использование аналогичного устройства (ПКП-5) сопровождалось многолетней практикой «старых» опытных измерителей. Для силовых кабелей такой исторически практики не сложилось. Именно поэтому петлевой метод описывается во многих учебниках по поиску неисправностей, но практически не применяется [2].

Что требуется от современного прибора для того чтобы замечательный метод обрел настоящую жизнь? Необходим прибор, позволяющий показать расстояние до зоны повреждения путем нажатия кнопки. Измерительные мостовые процедуры и вычисления должны производиться автоматически.

## 2 поколения кабельных приборов



Измерительный мост ПКП-5



Измерительный мост с рефлектометром ИРК-ПРО Альфа

6

Современным стандартом для линейных измерений на кабелях связи является прибор ИРК-ПРО Альфа. Он объединяет рефлектометрический и мостовой методы в одном приборе. Для получения расстояния до повреждения изоляции кабеля мостовым методом измерителю достаточно нажать кнопку «УТЕЧКА». Измерительные и вычислительные процедуры производятся автоматически. Пользователь получает отфильтрованный результат в цифровом виде с высокой точностью.

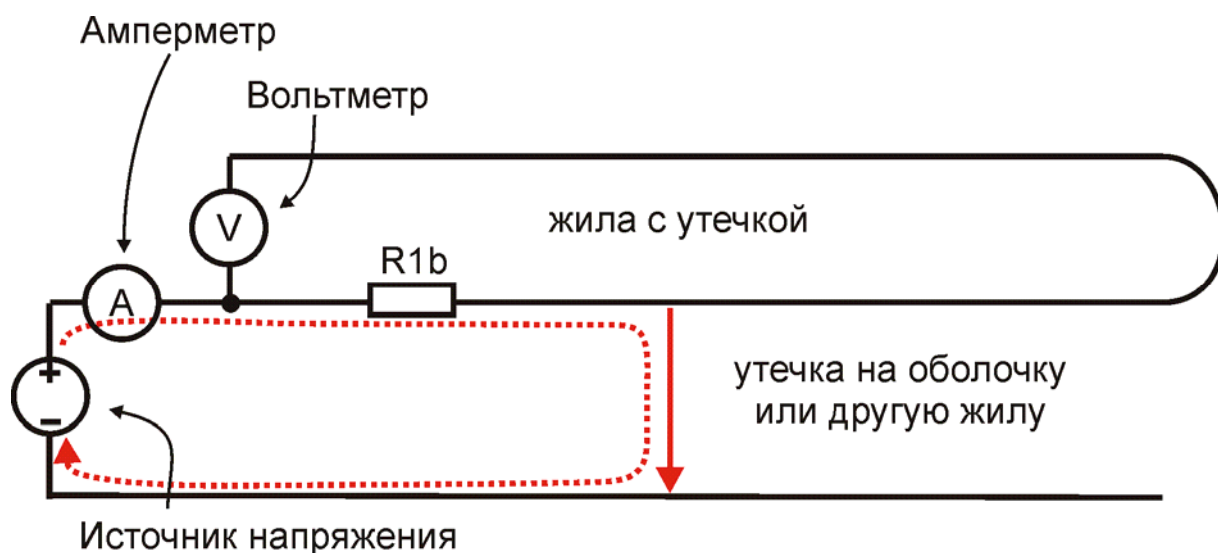
Казалось бы, логично применить такой прибор для локализации утечек в силовых кабелях. К сожалению, это возможно лишь для кабелей с сечением до 20 кв.мм. Измерения на силовых кабелях с большим сечением жилы отличаются спецификой, которая требует создания специализированной модели. В чем состоит специфика измерений?

## ОСНОВЫ ПЕТЛЕВОГО МЕТОДА (RFL)

Определение расстояния до места с пониженным сопротивлением изоляции жилы основано на измерении постоянным током сопротивления жилы до места утечки. Этот метод в современной литературе обозначен аббревиатурой RFL – Resistance Fault Locator (резистивный локатор утечки).



Чтобы провести измерения, необходимо включить участок с  $R_{1b}$  в электрическую цепь. Для этого нужна неповрежденная обратная жила в кабеле:



Обратная жила играет роль измерительного провода вольтметра для измерения падения напряжения  $V$  на участке с  $R1b$ . По закону Ома

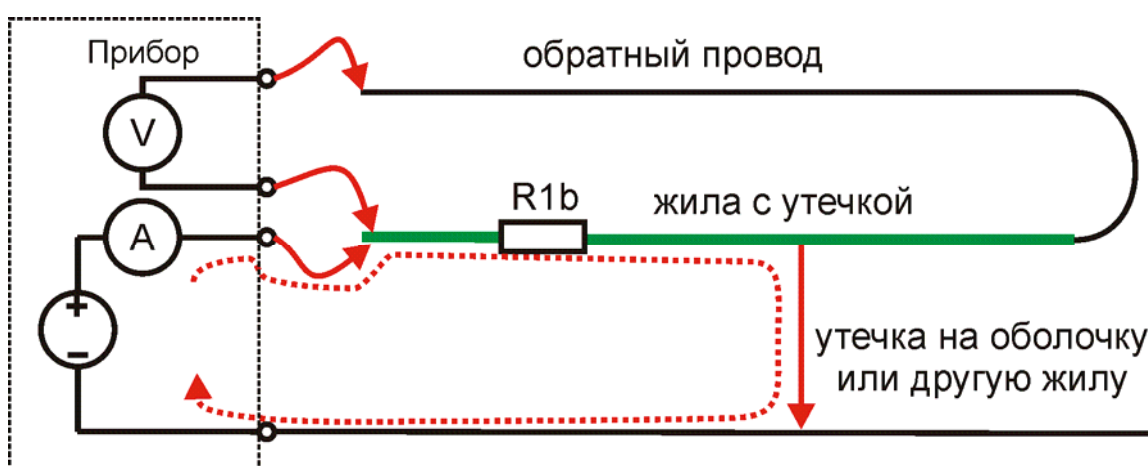
$$R1b = \frac{V}{I}$$

Техническая реализация (несмотря на очевидную простоту идеи) достаточно сложна.

### Подключение к кабелю. Схема Кельвина

Для кабелей с сечением до 200 кв.мм погрешность измерения даже порядка сотых долей Ом может привести к катастрофически большой ошибке. Сопротивление в точке подключения кабеля к измерительному прибору прибавляется к сопротивлению самого кабеля и может внести погрешность в измерение  $R1b$  и соответственно в определении места утечки.

Для устранения влияния соединительных проводов и контактов необходимо использовать четырехпроводную схему (схема Кельвина).



В этом случае сопротивление измерительных проводов и точки подключения не имеют существенного значения на точность измерения до величин порядка кОм.

## Обратная (измерительная) жила

---

Сопротивление изоляции обратного провода должно быть много больше сопротивления исследуемой утечки. Вольтметр должен показывать напряжение именно на R1b даже в условиях помех.

Если на обратном проводе плохая изоляция, то до вольтметра дойдет неправильное значение напряжения. Для обеспечения точности измерений R изоляции обратной жилы должно быть по крайней мере на 2 порядка больше поврежденной.

Это является естественным ограничителем по переходному сопротивлению в месте повреждения, которое может быть локализовано. Заводские нормы сопротивления изоляции жил находятся на уровне 50 МОм. Однако в процессе эксплуатации сопротивление изоляции заметно снижается. Нормой для изоляции считается уровень несколько МОм. Для кабелей с напряжением до 1 кВ допустимое значение составляет уже 0,5 МОм.

Уровень сопротивления изоляции неповрежденной жилы в 1 МОм ограничивает диапазон переходного сопротивления в месте утечки значениями 5 – 10 кОм. Выше этих значений недостаточно высокое сопротивление изоляции обратной жилы будет вносить большую погрешность в результат.

## Измерительный ток

---

Для кабелей связи (сечением до 1,5 мм<sup>2</sup>) мостовой метод локализации повреждений является основным. Высокая точность и устойчивость к помехам достигаются методами цифровой обработки. Удастся уверенно искать замыкания с переходным сопротивлением 20 МОм при значении измерительного тока в 0,02 мА. Зона локализации составляет 1-2 м.

Для силовых кабелей осложняющим фактором представляется большое сечение кабелей и малое значение погонного сопротивления. Увеличение сечения необходимо компенсировать пропорциональным увеличением измерительного тока.

Измерительный ток определяется тестовым напряжением и переходным сопротивлением в месте замыкания. С тестовым напряжением 24 В поиск утечки возможен для переходных сопротивлений в соответствии со следующей таблицей.

Сечение жилы [мм <sup>2</sup> ]	Измерительный ток [мА]	R переходное [кОм]
1	0,02	1 200
10	0,2	120
50	1	24
100	2	12
200	4	6

И таблицы видно, что данная конфигурация измерений обеспечивает требуемый диапазон переходных сопротивлений для локализации повреждения. Вместе с тем, потребляемая мощность измерительной схемы соответствует уровню полевых измерительных приборов.

## Место повреждения

---

Итак, петлевым методом можно определить сопротивление участка кабеля от прибора до точки утечки. Но на практике необходимо расстояние. Имеется несколько способов перевода сопротивления в расстояние.

1. Пересчет по погонному сопротивлению взятому из справочных данных о марке кабеля. Казалось бы, это самый верный способ. Но справочные данные не дают точных значений, а указывают погонное сопротивление в терминах «не хуже». Ко всему прочему погонное сопротивление зависит от температуры и необходимо вводить поправку.
2. Пересчет по фактическому сечению кабеля, удельному сопротивлению материала токопроводящей жилы и температуры. Здесь тоже много неопределенностей. Так при производстве может использоваться различные марки меди и алюминия с разными удельными сопротивлениями и температурными коэффициентами.

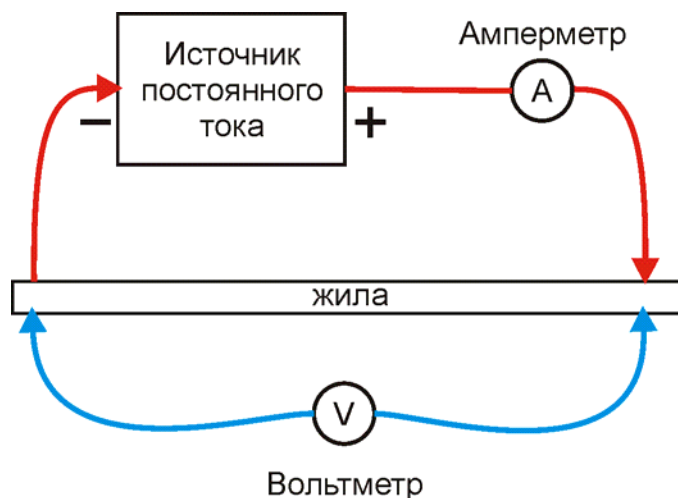
Материал жилы	Удельное сопротивление при 20°C [Ом·мм <sup>2</sup> /м]
Медь	0,01720
Медь А	0,01707
Медь В	0,01718
Медь С	0,01724
Алюминий	0,02826
Алюминий АМ	0,02800

Разброс составляет до 1% без учета температуры. Ошибка в температуре на 10°C градусов даст дополнительную погрешность в 4%.

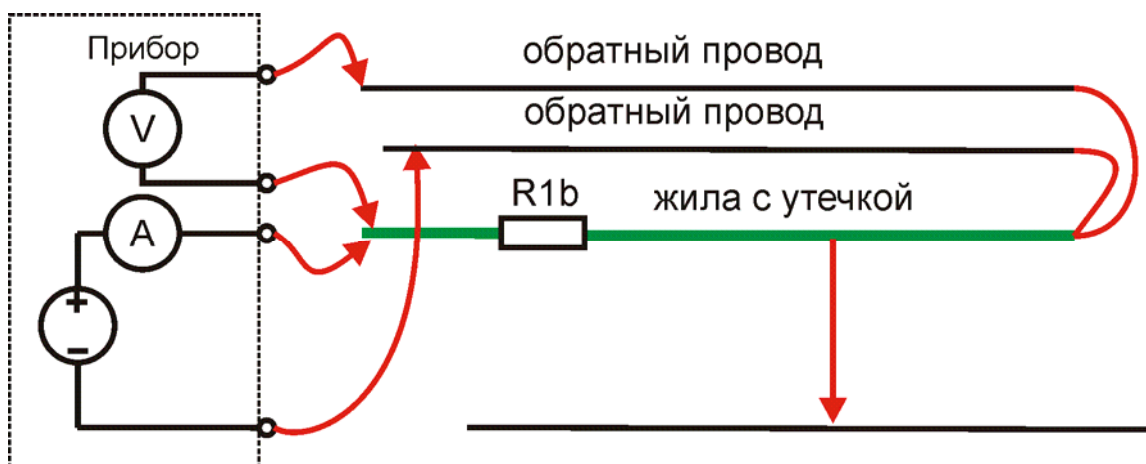
3. Можно сравнить сопротивление до утечки R<sub>1b</sub> с сопротивлением мерного участка того же кабеля, находящегося в идентичных условиях. В этом случае простая арифметика даст правильный результат по расстоянию. Но где взять такой мерный отрезок? **МОЖНО ИСПОЛЬЗОВАТЬ В КАЧЕСТВЕ МЕРНОГО ОТРЕЗКА САМ КАБЕЛЬ ОТ НАЧАЛА И ДО КОНЦА.** Для этого необходимо только измерить сопротивление жилы до локализации повреждения. Схема измерения включается в общую схему локализации утечки.

### Измерение сопротивления жилы кабеля. 1 способ.

Измерение сопротивления жилы по классической четырехпроводной схеме.

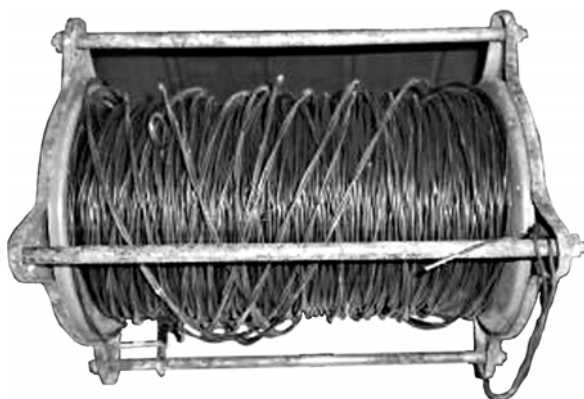


Для кабеля этот способ приводит к следующей схеме:



Для обеспечения четырехпроводной схемы необходимы две обратные хорошие жилы. Это легко сделать, если замыкание в кабеле однофазное. Такие однофазные повреждения жилы на оболочку считаются самыми распространенными [1].

Для многофазного замыкания необходимо проложить две вспомогательные жилы. Это можно сделать, например, с помощью популярного у военных полевого кабеля типа П-274(М) на катушке ТК-2. Такая катушка предназначена для оперативного развертывания линии из двух жил на местности и может вмещать до 500 м указанного кабеля.



#### Параметры кабеля П-274

Удельное сопротивление жилы:

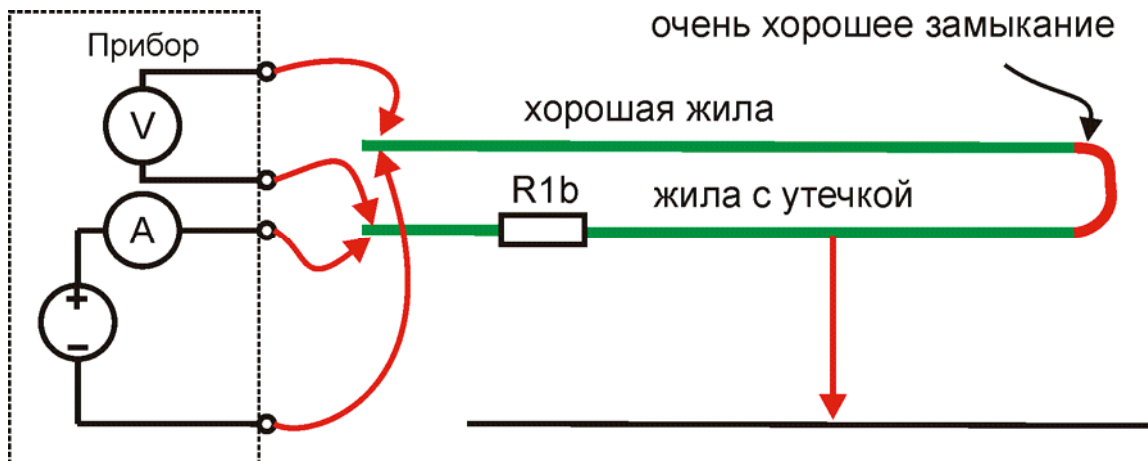
не более 65 Ом/км;

Сопротивление изоляции после 3 часов выдержки в воде:

не менее 1000 Мом.

### Измерение сопротивления жилы кабеля. 2 способ.

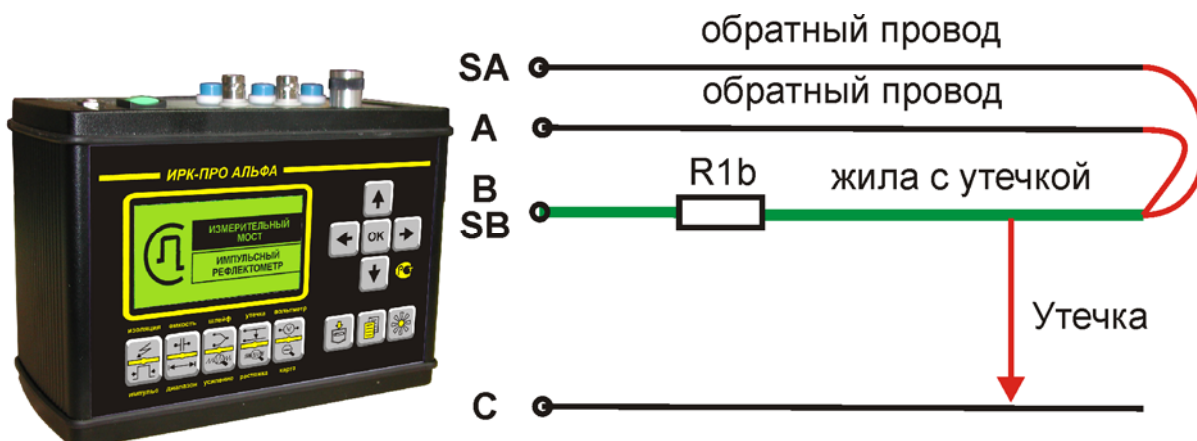
Практически то же самое, но используется сопротивление двух жил, замкнутых на дальнем конце.



В этом случае в кабеле необходима только одна хорошая жила. Сопротивление одной жилы можно получить, просто разделив результат на два. Недосток такого способа заключается в необходимости замыкания двух жил на дальнем конце с обеспечением очень малого вносимого дополнительного сопротивления. Если перемычка имеет сечение не меньше сечения жилы, то при условии хорошего контакта дополнительная ошибка составит 1 метр.

## АЛЬФА-Е: ВЕРСИЯ ДЛЯ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ

Описанные выше условия измерений для петлевого метода реализованы в специализированной модели ИРК-ПРО Альфа-Е. В качестве основного мостового метода прибор использует принцип сравнения сопротивления до места утечки с сопротивлением жилы кабеля, измеренной по четырехпроводной схеме. От оператора требуется подключить прибор к кабелю. Качество контактов и замыканий на дальнем конце не имеет слишком большого значения.



Измерителю остается нажать кнопку [УТЕЧКА] и получить расстояние до утечки в процентах от длины кабеля. Если ввести длину кабеля, прибор покажет расстояние до повреждения в метрах. Точность будет обеспечена параметрами измерений и мостовой схемой подключения.

Конечно, в приборе реализованы и все другие способы определения расстояния. Можно вводить сечение и температуру. Вести базу кабелей. Тестировать сопротивления изоляции. Использовать рефлектометр для локализации повреждений. Но главное назначение прибора заключается именно в современной поддержке петлевого метода поиска замыкания в силовом кабеле.

## ЛИТЕРАТУРА

---

1. Методические указания по определению места повреждения силовых кабелей напряжением до 10 кВ. РД 34.20.516-90. Министерство энергетики и электрификации СССР. Главное научно-техническое управление энергетики и электрификации. 10с.
2. Дементьев В.С. Как определить место повреждения в силовом кабеле. Библиотека электромонтера. М. Энергия. 1980. 72с.
3. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. Приказ Минэнерго РФ от 13 января 2003 г. № 6.