

КОНТРОЛЬ ИЗОЛЯЦИИ СЕТЕЙ НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ МЕТОДАМИ ДВУХ И ТРЕХ ОТСЧЕТОВ ВОЛЬТМЕТРА

Представлено застосування методів контролю ізоляції мереж низької напруги постійного і подвійного роду струму за допомогою вольтметра і резистора. Наведено формули для обчислення опору ізоляції методами двох і трьох відліків вольтметра. Запропоновано новий спосіб двох відліків вольтметра для мереж подвійного роду струму. Представлена модифікація розглянутих методів, що обмежує їх основний недолік – тривалість перехідного процесу. Бібл. 8, рис. 7.

Ключові слова: мережі низької напруги постійного і подвійного роду струму, опір ізоляції, метод двох і трьох відліків вольтметра.

Представлено применение методов контроля изоляции сетей низкого напряжения постоянного и двойного рода тока с помощью вольтметра и резистора. Приведены формулы для вычисления сопротивления изоляции методами двух и трех отсчетов вольтметра. Предложен новый способ двух отсчетов вольтметра для сетей двойного рода тока. Представлена модификация рассматриваемых методов, ограничивающая их основной недостаток – длительность переходного процесса. Библ. 8, рис. 7.

Ключевые слова: сети низкого напряжения постоянного и двойного рода тока, сопротивление изоляции, метод двух и трех отсчетов вольтметра.

Введение. Для безопасной и надежной эксплуатации электрических сетей первостепенной задачей является контроль изоляции. В сетях низкого напряжения постоянного и двойного рода тока довольно широкое применение получили способы периодического измерения сопротивления изоляции относительно земли с помощью вольтметра и резистора (называемые также методами отсчета вольтметра). Наиболее известной процедурой этого рода является метод трех отсчетов вольтметра [1]. Однако заслуживает внимания тоже более простой способ, использующий лишь два отсчета вольтметра. По сравнению с методом трех отсчетов вольтметра он вызывает меньшие колебания (отклонения) напряжений проводов сети от исходных значений, но зато не позволяет определить сопротивлений изоляции отдельных полюсов сети. На практике метод трех отсчетов вольтметра получил широкое применение в автоматизированных системах контроля и поиска мест повреждений изоляции.

Цель работы. В доступной литературе нет изложения теории измерений методами отсчета вольтметра. До сих пор не был предложен тоже способ ограничения их основного недостатка – чрезмерной длительности измерительного цикла. Поэтому в статье поставлена задача дать обзор способов определения сопротивления изоляции сетей постоянного и двойного рода тока с помощью резистора и вольтметра, а также представить проверенный на практике вычислительный алгоритм для сокращения продолжительности измерения. Дополнительно автором предложена новая измерительная процедура для расширения возможностей метода двух отсчетов вольтметра.

Метод двух отсчетов вольтметра Сети постоянного тока. Самый простой способ определения эквивалентного сопротивления изоляции R_i сетей постоянного тока использует добавочный резистор R_0 . Измеряются установленные напряжения избранного, например отрицательного полюса до и после включения этого резистора (рис. 1).

Искомое эквивалентное сопротивление изоляции вычисляется по формуле

$$R_i = R_0 \cdot \frac{(U_{21} - U_{22}) \cdot R_V}{U_{22} \cdot (R_0 + R_V) - U_{21} \cdot R_0}, \quad (1)$$

где U_{21} является напряжением отрицательного полюса до включения добавочного резистора, U_{22} – после включения этого резистора.

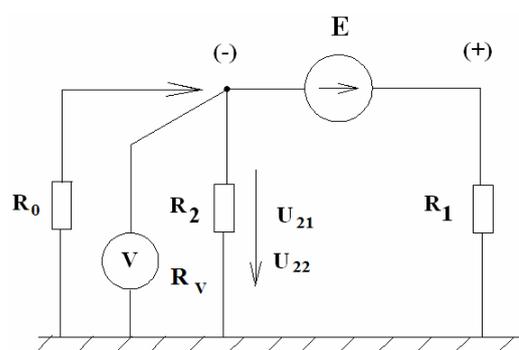


Рис. 1. Способ определения сопротивления изоляции сети постоянного тока с применением добавочного резистора: E – напряжение источника, R_1, R_2 – сопротивление изоляции полюса (+) и (-), R_0 – сопротивление добавочного резистора, R_V – сопротивление вольтметра, U_{21}, U_{22} – напряжение отрицательного полюса до и после включения добавочного резистора

Если внутреннее сопротивление вольтметра R_V значительно больше значения добавочного резистора т.е. $R_V \gg R_0$, то справедлива упрощенная формула

$$R_i = R_0 \cdot \frac{U_{21} - U_{22}}{U_{22}}, \quad (2)$$

которая вытекает непосредственно из теоремы Тевенена.

Сопротивления изоляции отдельных полюсов сети относительно земли вычисляются по формулам

$$R_1 = R_i \cdot \frac{E}{U_{21}} \quad \text{и} \quad R_2 = R_i \cdot \frac{E}{E - U_{21}},$$

но для этого надо знать значение напряжения сети E .

Необходимым условием для реализации этого метода является постоянное значение напряжения E . Это требование остается в силе также при применении всех других методов отсчета вольтметра.

Сети двойного рода тока. Метод двух отсчетов вольтметра можно использовать тоже в сетях двойного рода тока (AC/DC IT). В данной статье под термином «сеть двойного рода тока» понимается система, объединяющая цепи переменного и постоянного тока, имеющие между собой гальваническую связь. Пример такой системы показан на рис. 2, где трехфазная трехпроводная сеть переменного тока питает нагрузку

постоянного тока на выходе диодного выпрямителя. В зависимости от места проведения измерений доступны две реализации этого метода.

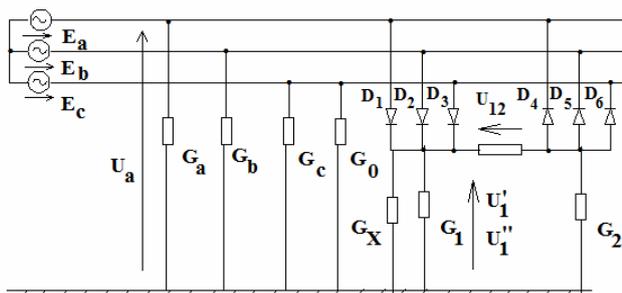


Рис. 2. Схема для двух способов определения эквивалентного сопротивления изоляции сети двойного рода тока с применением добавочных проводимостей: E_a, E_b, E_c – фазные напряжения источника, G_a, G_b, G_c – проводимости изоляции фаз сети, G_0, G_x – добавочные проводимости, U_1', U_1'' – напряжение положительного полюса до и после включения добавочного резистора, U_a – напряжение фазы a

В первом методе использованы измерения напряжений избранного полюса диодного выпрямителя относительно земли. В этом случае (см. рис. 2 без проводимости G_0) измеряются **средние** значения напряжения этого полюса, например положительного в нормальном рабочем режиме U_1' (без добавочной проводимости G_x) и при проводимости G_x подключенной между этим полюсом и землей U_1'' . Согласно [3] эти напряжения равны

$$U_1' = \frac{G_a + G_b + G_c + 2 \cdot G_2}{G_a + G_b + G_c + G_1 + G_2} \cdot \frac{U_{12}}{2}, \quad (3)$$

$$U_1'' = \frac{G_a + G_b + G_c + 2 \cdot G_2}{G_a + G_b + G_c + G_1 + G_2 + G_x} \cdot \frac{U_{12}}{2},$$

откуда получается искомый параметр

$$R_i = \frac{1}{G_a + G_b + G_c + G_1 + G_2} \quad (\text{эквивалентное сопротивление изоляции целой сети})$$

$$R_i = R_x \cdot \frac{U_1' - U_1''}{U_1}. \quad (4)$$

Во втором методе (предложенном автором) [2] использовано характерное свойство сетей двойного рода токов, т.е. появление отличного от нуля среднего значения фазных напряжений равного

$$U_{a-mean} = \frac{G_1 - G_2}{G_a + G_b + G_c + G_1 + G_2} \cdot \frac{U_{12}}{2}. \quad (5)$$

Предлагаемая процедура состоит из двух этапов. Сначала надо проверить, отличается ли от нуля среднее значение напряжения фазы сети U_{a-mean} . Если оно равно нулю, значит проводимости изоляции обоих полюсов выпрямителя относительно земли равны (т.е. $G_1 = G_2$) или эквивалентное сопротивление изоляции целой сети двойного рода токов равно нулю. В первом случае на выходе выпрямителя надо подключить к одному из полюсов резистор R_x так, чтобы получить среднее значение напряжения фазы сети отличным от нуля. После этого среднее значение напряжения фазы измеряется в нормальном рабочем режиме ($U_{a1-mean}$) и при добавочном резисторе R_0 подключенном между любой фазой (например, a) и землей ($U_{a2-mean}$). Искомый параметр R_i вычисляется по формуле

$$R_i = \frac{1}{\frac{1}{R_0} \cdot \frac{U_{a1-mean} - U_{a2-mean}}{U_{a2-mean}} - \frac{1}{R_x}}, \quad (6)$$

которая вытекает из (5).

Если в нормальном рабочем режиме среднее значение напряжения фазы сети отлично от нуля, добавочного резистора R_x не надо подключать и формула (6) принимает вид

$$R_i = R_0 \cdot \frac{U_{a1-mean} - U_{a2-mean}}{U_{a2-mean}}. \quad (7)$$

Надо заметить, что благодаря измерению **среднего** значения напряжений, емкости сети относительно земли не влияют на результат вычисления и поэтому они не показаны на схеме замещения сети на рис. 2.

Следует подчеркнуть, что формулы (2), (4) и (7) для метода двух отсчетов вольтметра во всех рассматриваемых сетях идентичны.

Метод трех отсчетов вольтметра.

Сети постоянного тока. Метод трех отсчетов вольтметра требует поочередного измерения вольтметром с известным внутренним сопротивлением R_V (или с параллельно подключенным добавочным резистором R_0) трех напряжений: U_{12} – между полюсами сети; U_1 – между положительным полюсом и землей; U_2 – между отрицательным полюсом и землей (рис. 3).

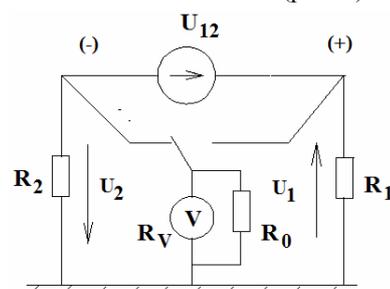


Рис. 3. Способ определения сопротивления изоляции сети постоянного тока методом трех отсчетов вольтметра: U_{12} – напряжение источника, R_1, R_2 – сопротивление изоляции полюса (+) и (-), R_0 – сопротивление добавочного резистора, R_V – сопротивление вольтметра, U_1 – напряжение полюса (+) после подключения вольтметра, U_2 – напряжение полюса (-) после подключения вольтметра

Расчет искомой величины эквивалентного сопротивления изоляции сети R_i проводится по общеизвестной формуле:

$$R_i = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{R_0 \cdot R_V}{R_0 + R_V} \cdot \frac{U_{12} - U_1 - U_2}{U_1 + U_2}. \quad (8)$$

Сопротивления изоляции отдельных полюсов сети выпрямленного тока R_1 и R_2 равны соответственно:

$$R_1 = \frac{R_0 \cdot R_V}{R_0 + R_V} \cdot \frac{U_{12} - U_1 - U_2}{U_2}, \quad (9)$$

$$R_2 = \frac{R_0 \cdot R_V}{R_0 + R_V} \cdot \frac{U_{12} - U_1 - U_2}{U_1}. \quad (10)$$

Можно показать, что формулы (8) – (10) верны, если полюсы сети заменить любыми двумя точками находящимися по противоположных сторонах так называемой нулевой точки батареи (т.е. точки с нулевым потенциалом относительно земли).

Сети двойного рода тока.

В сетях двойного рода тока определение эквивалентного сопротивления изоляции **целой сети** методом

трех отсчетов вольтметра [4] идентично вышеописанной процедуре для сетей постоянного тока (рис. 3). Итак, вольтметром с известным внутренним сопротивлением R_V (или с параллельно подключенным добавочным резистором R_0) измеряются следующие напряжения: U_{12} – между полюсами выпрямителя; U_1 – между положительным полюсом и землей; U_2 – между отрицательным полюсом и землей. Искомое значение вычисляется по той же самой формуле (8).

Примеры практического применения метода трех отсчетов вольтметра.

Устройство периодического контроля изоляции типа MD-04 (изготовитель C&T Elmech, Польша) [5] (рис. 4) предназначено для определения сопротивления изоляции сетей постоянного тока номинальным напряжением 24, 48, 60, 110 или 220 В. Прибор питается напряжением контролируемой сети. Измерение напряжений проводится автоматически после включения добавочного резистора между землей и каждым полюсом. После измерения установившихся значений напряжений микропроцессорная система вычисляет сопротивление изоляции отдельных полюсов. Оба результата выведены на дисплей. Устройство проводит измерение автоматически после подключения к сети, циклично с периодом избираемым в диапазоне 1 до 120 минут или вручную после двукратного нажатия кнопки. При падении сопротивления изоляции одного или обоих полюсов ниже установленного порога выдается оптический сигнал (диод LED), а затем измерение повторяется еще дважды. При подтверждении результата замыкается выходной контакт. Сигнал выдается тоже по RS485. Погрешность определения сопротивлений изоляции не превышает $\pm 10\%$. Время измерения устанавливается в пределе 4 с – 2 мин. Уставку надо выбрать в зависимости от максимальной емкости проводов сети относительно земли.



Рис. 4

Цикл работы устройства показан на приведенных осциллограммах (рис. 5, а, б). На осциллограмме на рис. 5, б следует обратить внимание на переходный процесс нарастания напряжения вызванный емкостью сети (в этом случае его длительность около 2 с).

Именно длительность переходного процесса (при высоких значениях сопротивления и емкости изоляции может достигать даже нескольких десятков секунд) является основным недостатком всех методов отсчета вольтметра. Для его сокращения в системе контроля изоляции типа KDZ-3 (изготовитель ZPrAE, Польша) [6, 7] внедрено дополнительный алгоритм, позволяющий уже на ранней стадии определить установившееся (конечное) значение напряжения данного полюса. Для этого измеряются значения напряжения в начальный момент $y_0(t_0=0)$ и в следующих интервалах $y_1(t_1)$ и $y_2(t_2)$ (рис. 6).

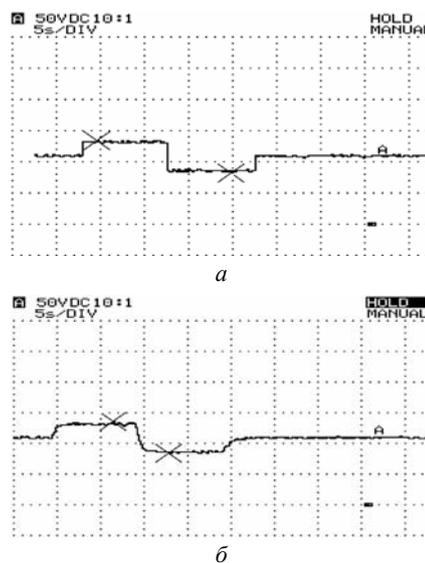


Рис. 5. Осциллограммы колебаний напряжения отрицательного полюса сети (от 85 до 130 В) во время работы устройства MD04: а – $R_f=45\text{ k}\Omega$, $C_f=0\text{ }\mu\text{F}$, б – $R_f=45\text{ k}\Omega$, $C_f=20\text{ }\mu\text{F}$

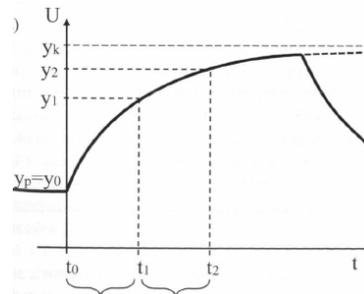


Рис. 6. Начальный участок функции напряжения данного полюса сети при подключении резистора ко второму полюсу

Принимается следующая формула функции этого напряжения $y(t)$

$$y(t) = y_k - (y_k - y_0)e^{-\frac{t}{T}}, \quad (11)$$

где y_k , T – неизвестные параметры.

Из системы уравнений для $t_2=2t_1$

$$y_1 = y_k - (y_k - y_0)e^{-\frac{t_1}{T}}; \quad (12)$$

$$y_2 = y_k - (y_k - y_0)e^{-\frac{t_2}{T}},$$

вычисляется искомый параметр – установившееся напряжение данного полюса y_k

$$y_k = \frac{y_0 \cdot y_2 - y_1^2}{y_2 - 2 \cdot y_1 + y_0}. \quad (13)$$

Этим способом можно сократить длительность цикла работы устройства на базе метода трех отсчетов вольтметра даже на 90 %.

Реле контроля цепей постоянного тока типа РКИ1. Устройство РКИ1 (изготовитель Чебоксарский электроаппаратный завод) [8] (рис. 7) предназначено для контроля цепей оперативного постоянного тока напряжением 110 и 220 В. Функции устройства включают измерение напряжения сети постоянного тока, сопротивления изоляции цепей постоянного тока (эквивалентного или для каждого полюса) и уровня пульсаций напряжения данной сети. Реле обеспечивает сигнализацию выхода измеренных электрических параметров за установленные пороговые значения.

Внутреннее сопротивление равно 100 кОм. Относительная погрешность определения сопротивления изоляции не превышает 1 %. Устройство может измерять сопротивление изоляции двумя методами: а) методом трех отсчетов вольтметра, б) методом двух вольтметров – вычисление сопротивления по измеренным напряжениям между полюсами сети и землей, которые пропорциональны соответствующим сопротивлениям изоляции. Разумеется, в сети может быть установлено только одно устройство контроля изоляции использующее данный метод. Это требование относится тоже к модулю MD04.



Рис. 7

Выводы.

1. В силу своей простоты методы периодического определения сопротивления изоляции относительно земли с помощью вольтметра и резистора получили довольно широкое применение в сетях постоянного и двойного рода тока. Альтернативой для них являются измерительные устройства, основанные на принципе наложения тестового сигнала постороннего источника.

2. Работа устройств на базе метода трех (или двух) отсчетов вольтметра вводит колебания напряжений проводов сети относительно земли. Однако такой же эффект вызывают также устройства с наложением тестового сигнала.

3. Представлен способ значительного сокращения длительности цикла работы устройств, использующих метод двух и трех отсчетов вольтметра.

4. Автором предложена процедура на базе двух отсчетов вольтметра для сетей двойного рода тока. Новизной является измерение среднего значения фазного напряжения в сети переменного тока, питающей диодный выпрямитель.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов Е., Дьячков А. Как правильно измерить сопротивление изоляции электроустановок // Новости электротехники. – 2002. – №1(13). Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2002/13/22.php>.
2. Olszowiec P. Insulation Measurement and Supervision in Live AC and DC Unearthed Systems. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2nd edition. Springer, 2014. doi: 10.1007/978-3-642-29755-7.
3. Olszowiec P. O wyznaczaniu napięć trójfazowych prostowników diodowych // Wiadomości Elektrotechniczne. – 2015. – vol.1. – no.10. – pp. 33-34. doi: 10.15199/74.2015.10.8.
4. Иванов Е., Дьячков А. Как правильно измерить сопротивление изоляции электроустановок // Новости электротехники. – 2002. – №2(14). Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2002/14/26.php>.
5. <http://www.elmech.pl/spis-produktow-2>.
6. KDZ-3. System kontroli i lokalizacji doziemien. Режим доступа: www.zprae.pl/download.php?file=pub/File/KDZ-3.pdf.
7. Opara A. Zastosowanie ekstrapolacji nieliniowej w systemie pomiaru i lokalizacji doziemienia // Wiadomości

Elektrotechniczne. – 2016. – vol.1. – no.2. – pp. 24-27. doi: 10.15199/74.2016.2.5.

8. Реле контроля цепей постоянного тока РКИ-1. Техническое руководство по эксплуатации (Редакция 02 от 01.04.2015). Режим доступа: http://srza.ru/uploads/catalog/srz_rki.pdf.

REFERENCES

1. Ivanov E., Diachkov A. How to measure correctly insulation resistance of electric systems? *Electrical engineering news*, 2002, no.1(13). Available at: <http://www.news.elteh.ru/arh/2002/13/22.php> (Accessed 12 September 2015). (Rus).
2. Olszowiec P. *Insulation Measurement and Supervision in Live AC and DC Unearthed Systems*. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2nd edition. Springer, 2014. doi: 10.1007/978-3-642-29755-7.
3. Olszowiec P. O wyznaczaniu napięć trójfazowych prostowników diodowych. *Wiadomości Elektrotechniczne*, 2015, vol.1, no.10, pp. 33-34. (Pol). doi: 10.15199/74.2015.10.8.
4. Ivanov E., Diachkov A. How to measure correctly insulation resistance of electric systems? *Electrical engineering news*, 2002, no.2(14). Available at: <http://www.news.elteh.ru/arh/2002/14/26.php> (Accessed 12 September 2015). (Rus).
5. Available at: <http://www.elmech.pl/spis-produktow-2> (Accessed 25 May 2016). (Pol).
6. KDZ-3. System kontroli i lokalizacji doziemien. Available at: www.zprae.pl/download.php?file=pub/File/KDZ-3.pdf (Accessed 10 July 2015). (Pol).
7. Opara A. Zastosowanie ekstrapolacji nieliniowej w systemie pomiaru i lokalizacji doziemienia. *Wiadomości Elektrotechniczne*, 2016, vol.1, no.2, pp. 24-27. (Pol). doi: 10.15199/74.2016.2.5.
8. *Реле контроля цепей постоянного тока РКИ-1. Техническое руководство по эксплуатации* [The relay DC control circuits РКИ-1. Technical Manual]. Available at: http://srza.ru/uploads/catalog/srz_rki.pdf (Accessed 22 September 2015). (Rus).

Поступила (received) 13.08.2016

Ольшовец Петр, MSc., инженер-электрик, Elporem i Elpoautomatyka Spółka z o.o., 28-200 Staszow, ul. Wschodnia 10/51, Poland, phone +48 606 613 976, e-mail: olpio@o2.pl

Piotr Olszowiec, MSc., Electrical Engineer, Elporem i Elpoautomatyka Spółka z o.o., 28-200 Staszow, ul. Wschodnia 10/51, Poland.

Low voltage networks insulation monitoring with two and three voltmeter readouts methods.

Purpose. In the paper there are described methods of two and three voltmeter readouts for insulation resistance periodic measurement in live DC and AC/DC IT networks. A new measuring method for AC/DC networks is proposed. Application of a novel algorithm for shortening of measurement cycle is explained. **Methodology.** All methods of two and three voltmeter readouts consist in connection of a resistor and measurement of mean value of network's fixed point-to-ground voltages. **Results.** A new algorithm implemented in KDZ-3 device enables determination of steady-state voltage of a DC network's pole much faster than in other exploited systems. **Originality.** In author's modification of two voltmeter readouts method, line-to-ground voltage mean value is measured at AC side of AC/DC network. This innovation has not been applied for implementation of periodic insulation monitoring in AC/DC IT networks yet. **Practical value.** The use of author's innovation will allow to execute measurements at AC side of AC/DC IT networks which might be necessary if rectifier's output circuits are unavailable. Shortening of measurement cycle duration of two or three voltmeter readouts method's is of great importance in networks with high capacitance. References 8, figures 7.

Key words: low voltage DC, AC/DC IT networks, insulation resistance, methods of two and three voltmeter readouts.