

P. Olszowiec

## МОДИФИКАЦИИ ВЕНТИЛЬНЫХ СХЕМ НЕПРЕРЫВНОГО КОНТРОЛЯ ИЗОЛЯЦИИ СЕТЕЙ НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

*Представлена работа різних вентильних схем вимірювання опору ізоляції мереж низької напруги з ізолюваною нейтраллю. Наведено формули для обчислення еквівалентного опору ізоляції при асиметрії лінійної напруги мережі. Запропоновано способи усунення недоліків цих схем з використанням однофазних випрямлячів. Показано можливості реалізації системи сигналізації про зниження опору ізоляції та пошуку місця замикання на землю. Бібл. 6, рис. 9.*

*Ключові слова:* мережі низької напруги з ізолюваною нейтраллю, опір ізоляції, діодний випрямляч, сигналізація про зниження опору ізоляції, пошук місця замикання на землю.

*Представлена работа разных вентильных схем измерения сопротивления изоляции сетей низкого напряжения с изолированной нейтралью. Приведены формулы для вычисления эквивалентного сопротивления изоляции при асимметрии линейных напряжений сети. Предложены способы устранения недостатков этих схем с использованием однофазных выпрямителей. Показаны возможности реализации системы сигнализации о понижении сопротивления изоляции и поиска места замыкания на землю. Библ. 6, рис. 9.*

*Ключевые слова:* сети низкого напряжения с изолированной нейтралью, сопротивление изоляции, диодный выпрямитель, сигнализация о понижении сопротивления изоляции, поиск места замыкания на землю.

**Введение.** Для безопасной и надежной эксплуатации электрических сетей первостепенной задачей является контроль изоляции. В сетях низкого напряжения с изолированной нейтралью довольно широкое применение получили вентильные схемы измерения сопротивления изоляции. Однако в последнее десятилетие, несмотря на многочисленные достоинства этой технологии, ведущее место заняли устройства контроля изоляции на базе наложенного тестового сигнала постороннего источника. Именно этим новым методам посвящено большинство материалов в технической литературе [1]. Тем не менее, считается целесообразным напомнить традиционные вентильные схемы измерения изоляции и рассмотреть возможные пути их совершенствования.

**Постановка задачи.** Главными достоинствами схем с диодными выпрямителями являются простота, отсутствие постороннего источника наложенного тока, быстрота и высокая точность работы, а также независимость результата измерения от емкостей сети [2]. До сих пор реализовано несколько вентильных схем непрерывного и периодического определения эквивалентного сопротивления изоляции сетей относительно земли. Однако эти разработки имеют также существенные недостатки, ограничивающие их применение.

**Целью данной статьи** является анализ существующих систем и предложенных автором усовершенствованных схем на базе простейших однофазных выпрямителей.

**Существующие разработки. Схема А.** Наиболее распространенной схемой непрерывного контроля изоляции сети без постороннего источника является система с двухполупериодным мостовым выпрямителем (рис. 1), питаемым от данной сети.

Линейное напряжение контролируемой сети питает трансформатор – его вторичная обмотка включена через выпрямитель и резистор  $R_0$  между одним из проводов сети и землей. Этот резистор ограничивает ток однофазного глухого замыкания на землю. Выпрямленный ток на выходе моста является тестовым

сигналом для определения эквивалентного сопротивления  $R_i$  изоляции сети относительно земли. Среднее значение напряжения  $U_{0-mean}$  на резисторе  $R_0$ , равно

$$U_{0-mean} = \sqrt{2} \cdot E_{bc} \cdot \frac{R_0}{R_0 + R_i}, \quad (1)$$

дает однозначную информацию об искомом параметре  $R_i$ . Его значение определяется формулой

$$R_i = R_0 \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot E_{bc} - U_{0-mean}}{U_{0-mean}}. \quad (2)$$

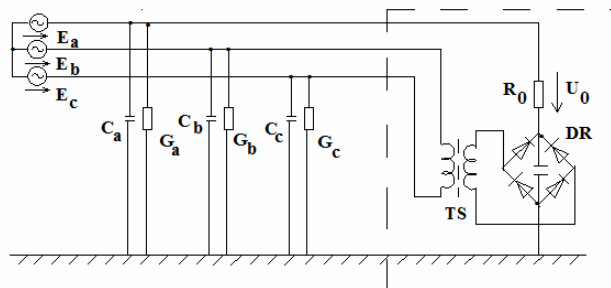


Рис. 1. Схема А измерения сопротивления изоляции трехфазной сети: TS – разделительный трансформатор, DR – двухполупериодный мостовой выпрямитель,  $R_0$  – токоограничивающий резистор,  $E_a, E_b, E_c$  – фазные напряжения источника,  $C_a, C_b, C_c$  – емкости изоляции фаз,  $G_a, G_b, G_c$  – проводимости изоляции фаз

Так как в установившемся режиме среднее значение за период всех токов заряда и разряда емкостей сети относительно земли равно нулю, то результат измерений не зависит от уровня этих параметров (т.е. емкостей) изоляции. Зато получаемое значение параметра  $R_i$  зависит одновременно от двух напряжений ( $E_{bc}$  и  $U_0$ ) контролируемой сети, что является главным недостатком этого, как, впрочем, и всех других методов подобного рода. Следует подчеркнуть, что формула (1) верна при всяком возможном искажении формы (рис. 2) выпрямленного напряжения  $U_0$ .

© Piotr Olszowiec

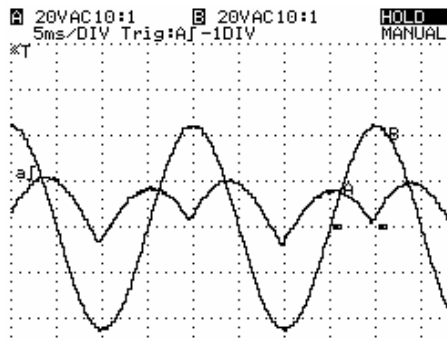


Рис. 2. Осциллограмма напряжений в схеме А измерения сопротивления изоляции трехфазной сети (пример): А – напряжение  $U_0$ , В – линейное напряжение

**Схема Б.** Измерительная схема Б (рис. 3) также обеспечивает непрерывный контроль изоляции сети относительно земли. Конденсатор емкостью  $C$  периодически пополняет свой заряд от фаз  $B$  и  $C$  через диод  $D$ . Когда диод закрыт, конденсатор разряжается через последовательно соединенных элементов: токоограничивающего резистора  $R_0$  и сопротивления изоляции сети.

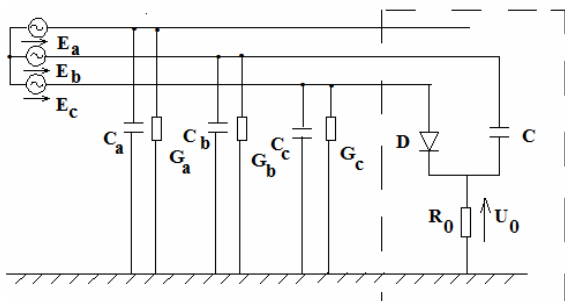


Рис. 3. Схема Б системы измерения сопротивления изоляции трехфазной сети: D – диод, C – конденсатор,  $R_0$  – токоограничивающий резистор

Как и в схеме А, среднее значение напряжения  $U_{0-mean}$  на резисторе  $R_0$  равно

$$U_{0-mean} = U_{C-mean} \cdot \frac{R_0}{R_0 + R_i}, \quad (3)$$

откуда получается искомый параметр  $R_i$

$$R_i = R_0 \cdot \frac{U_{C-mean} - U_{0-mean}}{U_{0-mean}}, \quad (4)$$

причем  $U_{C-mean}$  – среднее значение напряжения на конденсаторе.

Примерная осциллограмма напряжений в данной схеме показана на рис. 4. На нем виден периодический процесс заряда и разряда конденсатора.

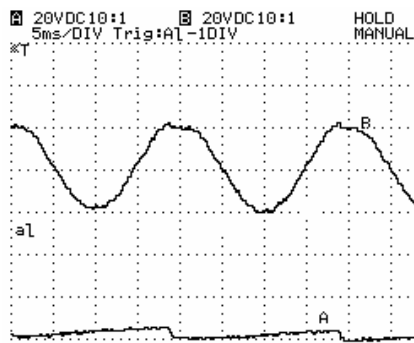


Рис. 4. Осциллограмма напряжений в схеме Б измерения сопротивления изоляции трехфазной сети (пример): А – напряжение  $U_0$ , В – линейное напряжение

При правильном выборе значений  $C$  и  $R_0$ , т.е. для достаточно большой постоянной времени измерительного контура, можно обеспечить практически постоянное напряжение источника тестового сигнала, которым является конденсатор. Для этого должно выполняться условие  $C \cdot R_0 \gg T$  ( $T$  – период напряжения сети). В этом случае формула (4) принимает вид

$$R_i = R_0 \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot E_{bc} - U_{0-mean}}{U_{0-mean}} \quad (5)$$

**Схема В.** Схема трехфазного выпрямителя с нулевым выводом принадлежит к наиболее популярным системам контроля изоляции (рис. 5) [3].

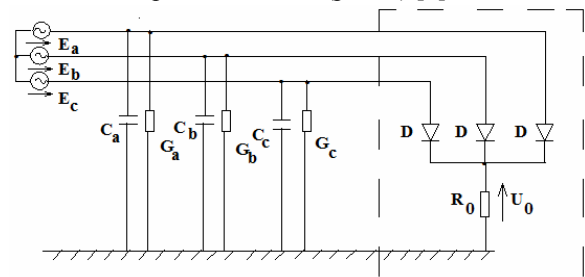


Рис. 5. Схема В системы измерения сопротивления изоляции трехфазной сети: D – диоды,  $R_0$  – токоограничивающий резистор

В этой схеме открыт этот диод, анод которого имеет в данный момент наивысший потенциал. Переход тока с одного диода на другой наступает мгновенно, когда их фазные напряжения становятся равными.

Для выведения формулы, определяющей среднее значение напряжения  $U_0$  на резисторе  $R_0$  при произвольной несимметричной системе напряжений  $E_a, E_b, E_c$  источника питания сети, удобно воспользоваться выражением для выходного напряжения мостовой схемы (рис. 6) [4]:

$$U_{12-mean} = \frac{\sqrt{2} \cdot (E_{ab} + E_{bc} + E_{ca})}{\pi}. \quad (6)$$

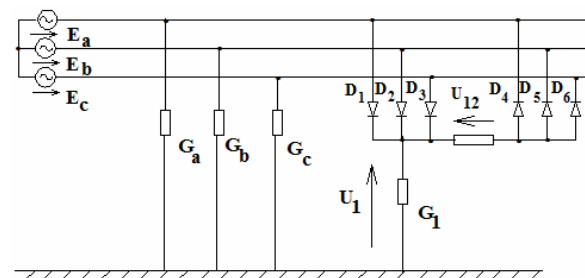


Рис. 6. Мостовая схема трехфазного диодного выпрямителя системы:  $D_1 \dots D_6$  – диоды выпрямителя,  $G_1$  – проводимость утечки изоляции положительного полюса

В этой же схеме среднее значение [5] напряжения положительного полюса относительно земли равно

$$U_{1-mean} = \frac{G_i}{G_i + G_1} \cdot \frac{U_{12-mean}}{2}. \quad (7)$$

Из (6) и (7) получается формула для среднего значения напряжения  $U_{0-mean}$  на резисторе  $R_0$  в схеме В

$$U_{0-mean} = \frac{\sqrt{2} \cdot (E_{ab} + E_{bc} + E_{ca})}{2\pi} \cdot \frac{R_0}{R_0 + R_i}, \quad (8)$$

откуда определяется искомая величина

$$R_i = \left( \frac{\sqrt{2} \cdot (E_{ab} + E_{bc} + E_{ca})}{2\pi \cdot U_{0-mean}} - 1 \right) \cdot R_0. \quad (9)$$

**Устранение недостатков схем А, Б, В.** Главным недостатком методов А, Б, В (кроме отсутствия самоконтроля исправности) является зависимость вычисляемого параметра  $R_i$  одновременно от линейных напряжений контролируемой сети и от напряжения  $U_0$ . Эти напряжения, разумеется, взаимно пропорциональны, но при использовании формул (2) и (4) надо знать текущие значения обоих величин. В случае колебаний напряжений источника питания необходимо проводить одновременные отсчеты двух вольтметров.

Градуировать шкалу вольтметра  $U_0$  в единицах сопротивления можно только при постоянном, известном значении данного напряжения сети.

В схеме В дополнительную трудность вносит возможная асимметрия напряжений источника питания. Для точного определения искомого параметра  $R_i$  по формуле (9) следует одновременно измерять все три линейные напряжения. От этого последнего затруднения можно избавиться простым способом, предложенным автором.

В схеме трехфазного выпрямителя с нулевым выводом достаточно оставить лишь два диода питаемые любым линейным напряжением [6] (рис. 7).

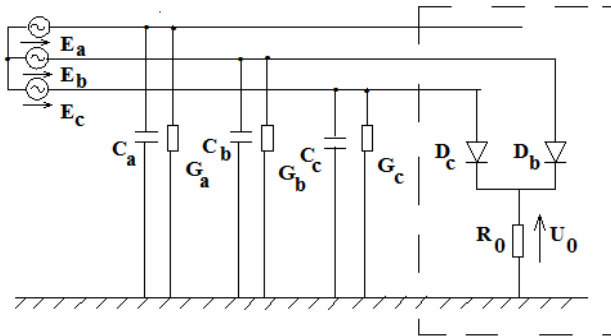


Рис. 7. Модифицированная схема непрерывного измерения эквивалентного сопротивления изоляции трехфазной сети с помощью двух диодов

Пусть выпрямитель питается линейным напряжением фаз  $b, c$

$$e_{bc}(t) = e_b(t) - e_c(t) = \sqrt{2} \cdot E_{bc} \cdot \sin \omega t,$$

а напряжение фазы  $a$  выражено функцией  $e_a(t) = \sqrt{2} \cdot E_a \cdot \sin(\omega t - \alpha)$ , причем параметры  $E_a, E_{bc}, \alpha$  могут принимать произвольные значения.

Переход тока с одного диода на другой наступает при нулевом значении напряжения  $e_{bc}(t)$ . В интервале  $0 < t < T/2$  открыт диод  $D_b$ . Баланс токов утечки на землю представляет уравнение

$$(G_b + G_0) \cdot u_0 + G_c \cdot (-e_{bc} + u_0) + G_a \cdot (u_0 - e_b + e_a) + C_b \cdot \frac{du_0}{dt} + C_c \cdot \frac{d(-e_{bc} + u_0)}{dt} + C_a \cdot \frac{d(e_a - e_b + u_0)}{dt} = 0. \quad (10)$$

В интервале  $T/2 < t < T$  открыт диод  $D_c$

$$(G_c + G_0) \cdot u_0 + G_b \cdot (e_{bc} + u_0) + G_a \cdot (u_0 - e_c + e_a) + C_c \cdot \frac{du_0}{dt} + C_b \cdot \frac{d(e_{bc} + u_0)}{dt} + C_a \cdot \frac{d(e_a - e_c + u_0)}{dt} = 0. \quad (11)$$

Обозначив  $G_i = G_a + G_b + G_c$  и  $C_i = C_a + C_b + C_c$ , оба уравнения можно записать так

$$(G_i + G_0) \cdot u_0 + C_i \cdot \frac{du_0}{dt} + G_a \cdot (e_a - e_b) + C_a \cdot \frac{d(e_a - e_b)}{dt} + G_c \cdot (-e_{bc}) + C_c \cdot \frac{d(-e_{bc})}{dt} = 0; \quad (12)$$

$$(G_i + G_0) \cdot u_0 + C_i \cdot \frac{du_0}{dt} + G_a \cdot (e_a - e_c) + C_a \cdot \frac{d(e_a - e_c)}{dt} + G_b \cdot e_{bc} + C_b \cdot \frac{de_{bc}}{dt} = 0. \quad (13)$$

После интегрирования уравнения (12) в пределах  $0 < t < T/2$  и (13) в пределах  $T/2 < t < T$  надо их почленно сложить. Так как интегралы всех емкостных токов за период  $T$  равны нулям и среднее значение любой синусоидальной функции тоже равно нулю, получается следующее уравнение

$$(G_i + G_0) \cdot \frac{1}{T} \int_0^T u_0 dt = (G_i + G_0) \cdot U_{0-mean} = \frac{\sqrt{2} \cdot E_{bc}}{\pi} \cdot G_i, \quad (14)$$

откуда вытекает

$$R_i = \frac{1}{G_i} = R_0 \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot E_{bc} - U_{0-mean}}{U_{0-mean}}. \quad (15)$$

В этом методе результат вычисления зависит от значения линейного напряжения  $E_{bc}$  избранных двух фаз сети. Затем возможная несимметрия векторов фазных напряжений источника  $\underline{E}_a, \underline{E}_b$  и  $\underline{E}_c$ , ни количество фаз сети уже не играют роли.

Основной недостаток всех представленных схем (необходимость одновременного отсчета напряжения контролируемой сети и напряжения  $U_0$ ), можно устранить в системе реализующей деление значений двух напряжений. Так, например, для совершенствования схемы В можно использовать логометр, который выполняет функцию деления напряжений

$\frac{\sqrt{2} \cdot E_{bc}}{\pi} - U_{0-mean}$  и  $U_{0-mean}$  поступающих на его входы (обмотки) 1 и 2 (рис. 8). Поэтому его показание соответствует величине данной формулой (15). Другим способом устранения рассматриваемого недостатка является применение стабилизированного напряжения выпрямленного тока.

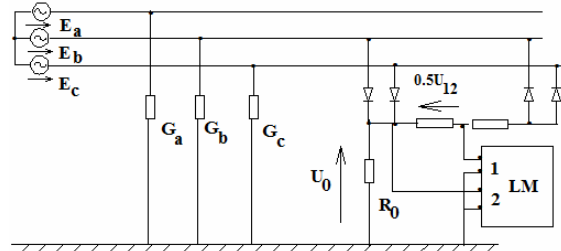


Рис. 8. Применение логометра (LM) для непрерывного измерения эквивалентного сопротивления изоляции с помощью диодного выпрямителя

#### Дополнительные достоинства схем А, Б, В.

Представленные схемы непрерывного измерения эквивалентного сопротивления изоляции сетей с помощью диодных выпрямителей имеют несколько ценных достоинств, до сих пор не в полной мере использованных на практике.

Первым из них является возможность реализации сигнализации о понижении сопротивления изоляции. Для этого в каждой из схем достаточно к резистору  $R_0$  подключить параллельно реле постоянного напряжения (DC). При пороге срабатывания  $U_{0-set}$  оно будет выявлять падение сопротивления изоляции ниже уставки, равной

$$R_{i-set} = R_0 \cdot \frac{E - U_{0-set}}{U_{0-set}}, \quad (16)$$

где  $E$  – напряжение источника тестового выпрямленного тока.

Например, в схеме на рис. 8:

$$E = \frac{\sqrt{2} \cdot E_{bc}}{\pi} = 0.5 \cdot U_{12-mean}. \quad (17)$$

К сожалению, недостатком этой простейшей системы является зависимость порога сигнализации о понижении сопротивления изоляции от колебаний напряжения сети ( $E$ ) при данной уставке срабатывания реле  $U_{0-ср}$ . Разумеется, этот недостаток можно устранить в системе, реализующей деление значений напряжений или применяя стабилизацию напряжения выпрямленного тока. Другим выходом является использование реле напряжения реагирующего на знак разницы

$$U_{0-mean} - E \cdot \frac{R_0}{R_0 + R_{i-set}},$$

что вытекает из (16).

Вторая ценность вентильных схем контроля изоляции – это пригодность для реализации поиска места замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью. Место повреждения изоляции можно выявлять, измеряя тестовый выпрямленный ток с помощью токовых клещей (тока DC, например Kyoritsu или Fluke). Процедура поиска замыканий на землю представлена на рис. 9.

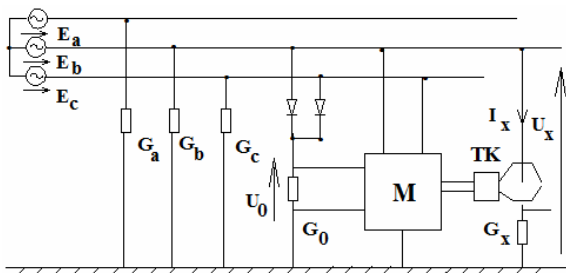


Рис. 9. Применение схемы непрерывного измерения эквивалентного сопротивления изоляции на базе диодного выпрямителя для поиска замыканий на землю:  $M$  – устройство определения сопротивления изоляции сети,  $TK$  – клещи постоянного тока

Так как среднее значение напряжения относительно земли одинаково для всех проводов сети, то средние значения токов утечки этих проводов пропорциональны проводимостям их изоляции. При поиске поврежденной изоляции клещами можно поочередно охватывать отдельные провода или многожильные кабели. Микропроцессорное устройство  $M$  определяет по формуле (15) эквивалентное сопротивление изоляции целой сети и по формуле

$$R_x = \frac{1}{G_x} = \frac{U_{x-mean}}{I_{x-mean}} \quad (18)$$

сопротивление изоляции отдельного провода или кабеля «х».

#### Выводы.

1. Традиционные системы непрерывного контроля изоляции на базе многофазных вентильных выпрямителей чувствительны к колебаниям линейных напряжений контролируемой сети и их возможной асимметрии.

2. Применение однофазного выпрямителя позволяет устранить вышеупомянутые затруднения, испытываемые при эксплуатации данных систем.

3. Вентильные схемы контроля позволяют дополнительно реализовать сигнализацию о понижении сопротивления изоляции и поиск места замыкания на землю.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Hofheinz W. *Protective Measures with Insulation Monitoring*. VDE Verlag, 1998.
- Цапенко Е.Ф. Контроль изоляции в сетях до 1000 В, 2-е изд. перераб. – М.: Энергия, 1972.
- Цапенко Е.Ф. Замыкания на землю в сетях 6-35 кВ, 2-е изд. перераб. М.: Энергоатомиздат, 1986.
- Olszowiec P. Unconventional Methods of Analyzing Diode Rectifiers with Asymmetrical Supply // *Computational Problems of Electrical Engineering*. – 2014. – №2. – pp. 33-36.
- 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.
- 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.

#### REFERENCES

- Hofheinz W. *Protective Measures with Insulation Monitoring*. VDE Verlag, 1998.
- Tsapenko E.F. *Kontrol' izoliatsii v setiakh do 1000 V* [Insulation monitoring in networks up to 1000 V]. Moscow, Energiya Publ., 1972. (Rus).
- Tsapenko E.F. *Zamykaniia na zemliu v setiakh 6-35 kV* [Earth faults in networks 6-35 kV]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986. (Rus).
- Olszowiec P. Unconventional Methods of Analyzing Diode Rectifiers with Asymmetrical Supply. *Computational Problems of Electrical Engineering*, 2014, no.2, pp. 33-36.
- 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.
- 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.

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,

#### Modifications of diode rectifier circuits for continuous insulation measurement in live AC IT networks.

**Purpose.** In the paper there are described few systems of insulation resistance continuous measurement using an imposed DC test signal delivered by diode rectifiers. Drawbacks of this technique are pointed out and ways of these shortcomings removal are proposed. **Methodology.** An improved version of measuring circuit based on a single-phase diode rectifier is presented. Application of logometric measuring devices is suggested. **Results.** A new insulation resistance continuous measuring system is insensitive to network voltages variation and asymmetry. Modified circuit enables also implementation of a simple device for alarming the monitored network's insulation deterioration and/or earth-fault protection. **Originality.** Formulas describing performance of diode rectifiers under asymmetrical supply have not been available so far. Both innovations (i.e. single-phase diode rectifier and logometric meter) have not been applied widely for implementation of continuous insulation monitoring in live AC IT networks. **Practical value.** Use of both innovations will allow to eliminate unrequired dependence of measurement results on variable network voltages as well as their possible asymmetry. Exploitation of diode rectifier circuits for earth fault location is also possible. References 6, figures 9.

**Key words:** low voltage AC IT networks, insulation resistance, diode rectifier, insulation resistance decline alarming, earth fault location.