



## ЭКСПЛУАТАЦИЯ, МОНТАЖ И НАЛАДКА

### Совершенствование вентильных схем измерения сопротивления изоляции сетей низкого напряжения с изолированной нейтралью

Ольшовец П., инж. (Польша)

Известные методы непрерывного измерения сопротивления изоляции сетей низкого напряжения с изолированной нейтралью с помощью вентильных схем имеют существенные недостатки, ограничивающие их применение. Предложены способы устранения чувствительности этих схем к несимметрии напряжений питания и зависимости от колебаний их значений путем использования двухфазных выпрямителей и логометрических измерительных приборов. Рассмотрен новый метод непрерывного и периодического определения эквивалентного сопротивления изоляции на базе измерения среднего значения фазного напряжения сети.

**Ключевые слова:** сети с изолированной нейтралью, эквивалентное сопротивление изоляции, диодный выпрямитель, среднее значение напряжения, логометрический измерительный прибор.

Для обеспечения безопасной и надежной эксплуатации электрических сетей необходимо осуществлять контроль изоляции. В сетях низкого напряжения с изолированной нейтралью широкое применение получили вентильные схемы измерения сопротивления изоляции. Их главными достоинствами являются простота, отсутствие постороннего источника наложенного тока, а также независимость получаемого результата измерения от емкости сети. С помощью диодных выпрямителей реализовано несколько схем непрерывного и периодического определения эквивалентного сопротивления изоляции сети относительно земли. Однако они имеют существенные недостатки, ограничивающие их применение. Поэтому автором предложены новые, усовершенствованные схемы на базе простейших двухфазных выпрямителей.

#### Существующие схемы с диодными выпрямителями

Ниже представлены две наиболее распространенные схемы с диодными выпрямителями для сетей с произвольным числом фаз. Схема **непрерывного** контроля изоляции [1, 2] для трехфазной сети показана на рис. 1.

Три диода, соединенные в звезду, питают выпрямленным током измерительную цепь, состоящую из амперметра  $A$  и токоограничивающего резистора  $R_0$ . Среднее значение измерительного тока  $I_{A-mean}$ , не зависящее от емкости сети, определяется по формуле

$$I_{A-mean} = \frac{3\sqrt{3} \cdot \sqrt{2}}{2\pi} \frac{E}{R_0 + R_i}, \quad (1)$$

где

$$R_i = \frac{1}{G_a + G_b + G_c} \quad (2)$$

— эквивалентное сопротивление изоляции сети относительно земли;  $E$  — среднеквадратичное значение фазной ЭДС симметричного трехфазного источника питания.

Из формулы (1) находим искомое значение  $R_i$ :

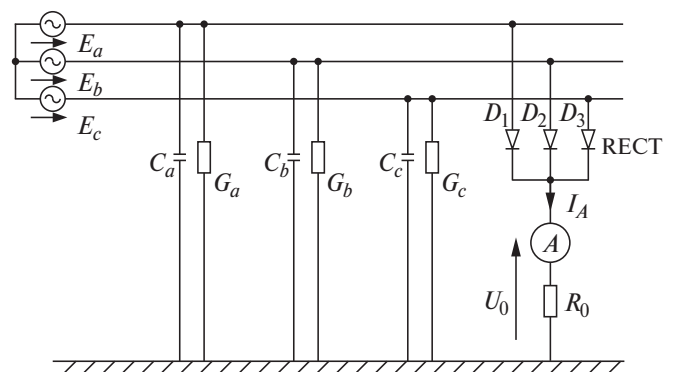


Рис. 1. Традиционная схема непрерывного измерения эквивалентного сопротивления изоляции трехфазной сети:

$E_a, E_b, E_c$  — фазные напряжения источника;  $G_a, G_b, G_c$  и  $C_a, C_b, C_c$  — проводимости и емкости изоляции отдельных фаз относительно земли;  $D_1, D_2, D_3$  — диоды трехфазного нулевого выпрямителя RECT;  $R_0$  — резистор;  $U_0$  и  $I_A$  — напряжение на резисторе и ток резистора

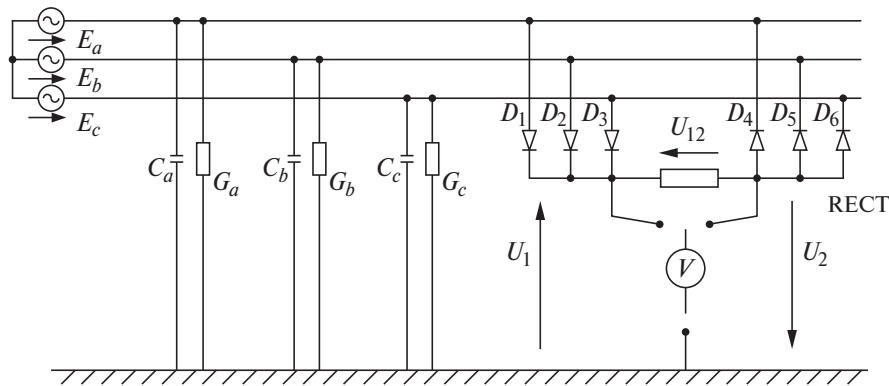


Рис. 2. Схема периодического определения эквивалентного сопротивления изоляции трехфазной сети с помощью мостового выпрямителя RECT:

$D_1 - D_6$  и  $U_{12}$  — диоды и выходное напряжение моста;  $U_1$  и  $U_2$  — напряжения положительного и отрицательного полюсов относительно земли

$$R_i = \frac{3\sqrt{3}\sqrt{2}}{2\pi} \frac{E}{I_{A-mean}} - R_0. \quad (3)$$

Основным недостатком этой схемы является зависимость показаний амперметра (градуированного в килоомах) от колебаний напряжения питания сети. Кроме того, для правильной работы схемы требуется полная симметрия всех ЭДС источника ( $E_a$ ,  $E_b$  и  $E_c$ ).

Следует отметить, что указанная зависимость результата от несимметрии напряжений источника отсутствует при **периодическом** определении эквивалентного сопротивления изоляции с помощью мостовой схемы диодного выпрямителя. На рис. 2 показана измерительная цепь, предназначенная для выявления значения этого параметра в трехфазных сетях известным методом трех отсчетов вольтметра, применяемым в сетях постоянного тока. При его использовании для сетей переменного тока с изолированной нейтралью [3, 4] сопротивление изоляции обоих полюсов выпрямителя относительно земли должно быть бесконечно.

Определение среднего значения выпрямленных напряжений вольтметром с внутренним сопротивлением  $R_V$  состоит из трех этапов, включающих в себя измерение выходного напряжения моста  $U_{12}$ , напряжения положительного полюса относительно земли  $U_1$ , напряжения отрицательного полюса относительно земли  $U_2$ . Искомое значение эквивалентного сопротивления изоляции  $R_i$  находят по формуле

$$R_i = R_V \frac{U_{12} - U_1 - U_2}{U_1 + U_2}. \quad (4)$$

Формула (4) справедлива для многофазных сетей с произвольной несимметрией ЭДС источника питания. Единственным требованием является постоянство их значений в течение измерений.

#### Совершенствование измерительных схем с диодными выпрямителями

Для исключения вышеуказанных недостатков схемы непрерывного контроля изоляции (см. рис. 1) воспользуемся некоторыми свойствами двухфазных выпрямителей. В схеме на рис. 1 достаточно оставить лишь два диода, питаемых любым линейным напряжением трехфазной сети. В таком случае эквивалентное сопротивление изоляции определяется по формуле

$$R_i = \frac{1}{G_i} = R_0 \frac{\sqrt{2} E_{ab} - U_{0-mean}}{U_{0-mean}}, \quad (5)$$

где  $E_{ab}$  — линейное напряжение питания двухфазного выпрямителя;  $U_{0-mean}$  — среднее значение напряжения на резисторе  $R_0$ .

При использовании данного метода необходимо знать значение линейного напряжения двух фаз сети (в данном случае —  $a$ ,  $b$ ), которое может колебаться. Зато ни возможная несимметрия фазных ЭДС источника  $E_a$ ,  $E_b$  и  $E_c$ , ни количество фаз сети не влияют на результат. Однако в рассматриваемом варианте упомянутые недостатки схемы непрерывного контроля изоляции устранены лишь частично.

Подобную модификацию можно реализовать также в схеме периодического определения эквивалентного сопротивления изоляции сети на базе мостового диодного выпрямителя

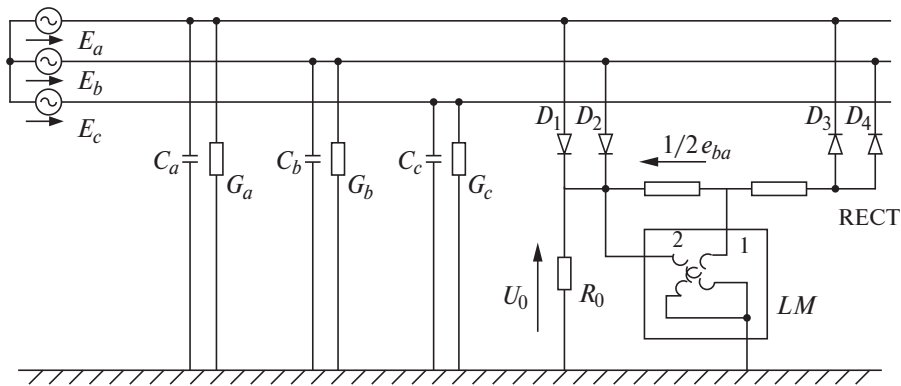


Рис. 3. Схема непрерывного измерения эквивалентного сопротивления изоляции трехфазной сети с помощью двухфазного мостового выпрямителя RECT и логометра LM:

$D_1 - D_4$  — диоды моста;  $R_0$  — добавочный резистор

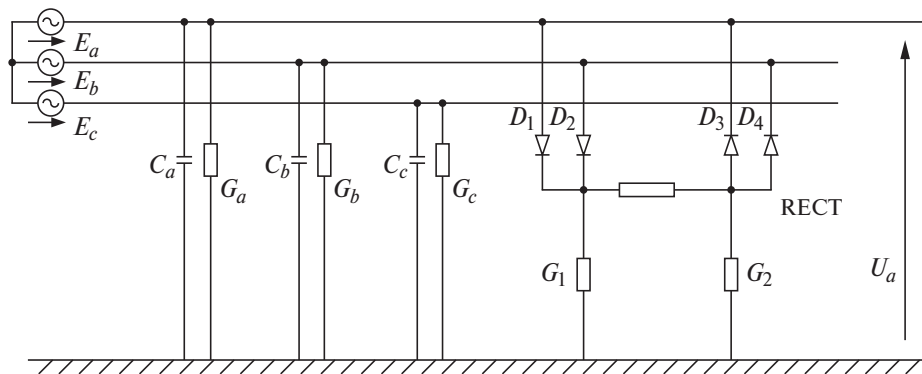


Рис. 4. Эквивалентная схема трехфазной сети с мостовым выпрямителем RECT, подключенным к фазам  $a, b$ , для расчета среднего значения фазного напряжения:

$G_1, G_2$  — проводимости изоляции полюсов выпрямителя;  $U_a$  — напряжение фазы  $a$  сети

ля. На рис. 3 показана предлагаемая измерительная система двухфазного мостового выпрямителя, подключенного к трехфазной сети.

Так как представленная схема по сути похожа на предыдущую, то и в этом случае для вычисления эквивалентного сопротивления изоляции сети справедлива формула (5). Ее можно использовать при практической реализации системы **непрерывного** измерения эквивалентного сопротивления изоляции сети. В данной схеме применен логометр, который выполняет функцию деления напряжений  $\frac{\sqrt{2}E_{ab}}{\pi} - U_{0-mean}$  и  $U_{0-mean}$ , поступающих на его входы (или обмотки). Поэтому показание логометра соответствует значению, полученному по формуле (5). В отличие от схемы двухфазного нулевого выпрямителя работа этой схемы не зависит (благодаря делению напряжений) от колебаний линейных напряжений сети.

### Новый метод определения сопротивления изоляции

Для реализации нового метода определения эквивалентного сопротивления изоляции тоже применяется мостовой двухфазный выпрямитель (рис. 4). В нем использовано характерное для сетей постоянного и переменного токов (сетей с подключенными вентильными выпрямителями) свойство — появление среднего значения фазных напряжений, отличного от нуля. Его зависимость от параметров изоляции сети с произвольным числом фаз выражается в виде формулы

$$U_{a-mean} = \frac{\sqrt{2}E_{ab}}{\pi} \frac{G_2 - G_1}{G_i + G_1 + G_2}, \quad (6)$$

где  $G_i$  — эквивалентная проводимость изоляции сети относительно земли.

Если значения проводимостей изоляции обоих полюсов  $G_1$  и  $G_2$  разные, то среднее значение напряжения в любой точке сети переменного тока относительно земли отли-

чается от нуля, что характерно для сетей постоянного и переменного токов. Это можно использовать для реализации нового метода **периодического** определения эквивалентного сопротивления изоляции сети с изолированной нейтралью, состоящего из двух этапов. На выходе мостового выпрямителя с бесконечным сопротивлением изоляции обоих полюсов выпрямителя относительно земли ( $G_1 = G_2 = 0$ ) надо к одному из них подключить резистор (например,  $R_x$ ) так, чтобы получить среднее значение напряжения фазы сети, отличное от нуля. Это значение измеряется в нормальном рабочем режиме ( $U_{a1-mean}$ ) и при подключении добавочного резистора  $R_y$  между любой фазой ( $a$ ,  $b$  или  $c$ ) и землей ( $U_{a2-mean}$ ). Искомый параметр  $R_i$  вычисляется из выражения

$$R_i = \frac{1}{\frac{1}{R_y} \frac{U_{a2-mean}}{U_{a1-mean}} - \frac{1}{R_x}}, \quad (7)$$

которое получают исходя из формулы (6).

Этот метод пригоден для многофазных сетей с произвольной несимметрией напряжений источника питания. Единственным требованием так же, как при использовании формулы (4), является постоянство значений этих напряжений во время измерений.

Формула (6) тоже может использоваться для реализации системы **непрерывного** измерения эквивалентного сопротивления изоляции сети. Если принять  $G_1 = 0$ , то из нее получится выражение

$$R_i = R_2 \frac{U_{a-mean}}{\sqrt{2} E_{ab} - U_{a-mean}} \cdot \pi \quad (8)$$

Его можно использовать для вычисления искомого параметра, применяя, например, микропроцессорный прибор. К одному его входу подводится линейное напряжение  $e_{ab}(t)$ , а к другому — напряжение выбранной фазы, например  $u_a(t)$ , с целью определения средних значений этих величин, т. е. соответственно  $E_{ab}/\pi$  и  $U_{a-mean}$ . Очевидно,

результат определения текущего значения  $R_i$  не зависит ни от колебаний значений, ни от возможной несимметрии напряжений отдельных фаз сети. Эти достоинства являются отличительными чертами обоих усовершенствованных схем **непрерывного** измерения эквивалентного сопротивления изоляции многофазных сетей.

### Выводы

1. Применяемые на практике схемы непрерывного определения эквивалентного сопротивления изоляции сети на базе диодных выпрямителей имеют существенные недостатки, ограничивающие их применение. К ним относятся прежде всего зависимости показаний прибора от колебаний и возможной несимметрии линейных напряжений сети.

2. Для устранения чувствительности ко всякой несимметрии напряжений питания предлагается замена многофазных выпрямителей простейшими двухфазными схемами. Это делает прибор универсальным, пригодным как для непрерывного, так и для периодического измерения в сетях с произвольным числом фаз.

3. Используя двухфазные выпрямители, можно с помощью традиционных логометрических приборов или микропроцессорных устройств создавать простые схемы непрерывного измерения. Реализованное в них деление соответствующих измеряемых величин позволяет устранить зависимость показаний прибора от колебаний напряжения сети.

### Список литературы

1. Цапенко Е. Ф. Контроль изоляции в сетях до 1000 В. 2-е изд., перераб. — М.: Энергия, 1972.
2. Цапенко Е. Ф. Замыкания на землю в сетях 6–35 кВ. — М.: Энергоатомиздат, 1986.
3. Иванов Е., Дьячков А. Как правильно измерить сопротивление изоляции электроустановок. — Новости Электротехники, 2002, № 2.
4. Olszowiec P. Insulation Measurement and Supervision in Live AC and DC Unearthed Systems. — Lecture Notes in Electrical Engineering, vol. 167, Springer 2012.

olpio@o2.pl