

1. Веников В.А., Герценберг Г.Р., Совалов С.А., Соколов Н.И. Сильное регулирование возбуждения. – М.-Л.: Государственное энергетическое издательство, 1963. – 152с.
2. Аллаев К.Р., Мирзабаев А.М. Малые колебания электрических систем. – Т.: «Fan va texnologiya», 2011. – 316 с.
3. Воронов А.А. Введение в динамику сложных управляемых систем. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. , 1985. – 352 с.
4. Дорф Р.К., Бишоп Р.Х. Современные системы управления // Пер.с англ. Б.И. Копылова. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2004. – 832 с.
5. Аллаев К.Р., Махмудов Т.Ф. Применение функции Ляпунова в квадратичной форме для исследования статической устойчивости регулируемой электрической системы // Проблемы энерго- и ресурсосбережения. — 2012. — № 3-4. — С. 10-19.
6. Махмудов Т.Ф. Матричные способы синтеза оптимальных систем возбуждения синхронных генераторов // Электротехнические системы и комплексы. —2012. —№20. —С. 204-212.

УДК 621.3

## О ВЫБОРЕ УСТАВОК УСТРОЙСТВ КОНТРОЛЯ ИЗОЛЯЦИИ СЕТЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

*P. Olszowiec*

*ER-EA Sp. z o.o. , Польша, г. Staszow  
olpio@o2.pl*

### **Аннотация**

В статье рассмотрены требования правил и существующие способы выбора уставок устройств контроля изоляции сетей постоянного тока. Автором принят модифицированный подход учитывающий важнейшие угрозы для безопасной и правильной работы сети и персонала, т.е. поражение человека электрическим током, возникновение пожара и взрыва, а также неправильное срабатывание электрических аппаратов. Дан анализ основных случаев ложной работы аппаратов, показан способ определения областей значений сопротивлений изоляции отдельных полюсов, при которых появляются вышеупомянутые угрозы. Предложены новые критерии оценки уровня изоляции на базе сравнения напряжений.

**Ключевые слова:** сети постоянного тока, изоляция относительно земли, ложная работа аппаратов, уставка устройства контроля изоляции

# SELECTION OF RESPONSE VALUES OF DC NETWORKS INSULATION MONITORS

*P. Olszowiec*

*ER-EA Sp. z o.o. , Poland, Staszow  
olpio@o2.pl*

## **Abstract**

In the paper there are presented regulatory requirements and existing methods of insulation monitors response values selection in DC networks. A modified approach is proposed which takes into account main threats to safe and reliable operation i.e. electric shock, fire and explosion as well as relays malfunction. Most common cases of devices malfunction are explained. Method of plotting characteristics of respective hazards on the plane of insulation resistances is described. There are also given new criteria of the above listed threats detection based on voltages comparison which could replace an inconvenient analysis of insulation resistances values.

**Key words:** dc networks, network-to-ground insulation, relays malfunction, insulation monitors response values

## **Актуальность работы**

Состояние изоляции является важнейшим фактором, влияющим на безопасность эксплуатации сетей постоянного тока изолированных от земли. Основным показателем состояния изоляции этих сетей относительно земли является эквивалентное сопротивление. Этот параметр означает результирующее сопротивление всех элементов существующих между гальванически соединенными точками сети и землей.

На практике известны многие способы периодического и несколько методов непрерывного определения сопротивления изоляции в сетях постоянного тока под рабочим напряжением. Методы непрерывного определения значения этого параметра нашли применение в многочисленных устройствах контроля изоляции. Целесообразность использования этих устройств обусловлена правильным установлением порогов срабатывания сигнализации понижения сопротивления изоляции контролируемой сети.

Правильные уставки этих порогов должны обеспечивать своевременное выявление всяких случаев ухудшения состояния изоляции, при которых появляется угроза для безопасной и правильной работы сети и персонала. В противоположном случае применение вышеупомянутых устройств сводится лишь к выявлению замыканий на землю или просто теряет смысл.

Из всех возможных угроз в рассмотрение обычно принимается

поражение человека электрическим током, возникновение пожара и взрыва, а также неправильное срабатывание электрических аппаратов.

На сегодняшний день нет утвержденной методики выбора уставок устройств контроля изоляции сетей постоянного тока. Поэтому на практике уставку сигнализации выбирают другим способом: либо по требованиям правил эксплуатации или порог устанавливают ниже уровня выступающего в нормальных рабочих условиях сети.

В статье рассмотрен существующий подход и предложены разработанные автором рекомендации по решению данной задачи.

Статья публикуется для обсуждения.

### ***Требования к уровню изоляции сетей постоянного тока***

При достаточно высоком сопротивлении изоляции относительно земли работа сети и питаемых цепей может продолжаться даже после возникновения одного глухого замыкания на землю любого полюса сети. Если же этот параметр ниже допустимого уровня (его значение определено в дальнейшем), то вышеупомянутые угрозы становятся реальными.

Согласно требованиям правил во многих странах ЕС минимальное значение эквивалентного сопротивления изоляции цепей оперативного постоянного тока равно  $200 \text{ Ом} / 1 \text{ В}$  (на каждый вольт номинального напряжения). При падении этой величины до  $100 \text{ Ом} / 1 \text{ В}$  должна срабатывать сигнализация. Дополнительный критерий относится к сетям с системами поиска замыканий на землю. Здесь уставка сигнализации понижения сопротивления изоляции должна обеспечивать выявление всех случаев, для которых ток утечки (на землю) поврежденного кабеля выше порога чувствительности детектора этого тока.

Традиционный подход к выбору уставки устройств мониторинга изоляции в сетях постоянного тока, питающих цепи контроля автоматики защиты основан на рассмотрении следующего случая неправильной работы релейной схемы (рис. 1).

При замыкании на землю зажима реле  $P$ , оно срабатывает или не отпускает после размыкания контакта  $P_1$ . В рассмотрение принимается второй случай, так как ток отпускания реле ниже тока его возбуждения. Очевидно, необходимое для этого случая неправильной работы реле эквивалентное сопротивление изоляции сети принимает максимальное значение, если вся утечка на землю сосредоточена на положительном полюсе сети (т.е.  $R_{\text{из}} = R_1$ , как показано на рис. 1).

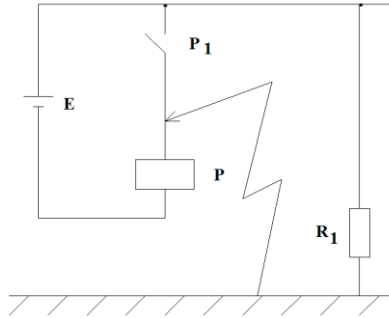


Рис.1. Иллюстрация неправильной работы релейной схемы – после размыкания контакта  $P_1$  реле  $P$  не отпускает

Согласно показанной схеме ток отпускания реле равен (принят коэффициент 1,05 для возможного превышения номинального напряжения источника  $E$ )

$$I_{отпуск} = \frac{U_{отпуск}}{R_p} = \frac{1,05 \cdot E - U_{отпуск}}{R_{из}}, \quad (1)$$

где  $U_{отпуск}$ ,  $I_{отпуск}$  - напряжение и ток отпускания реле,  $R_p$  – его входное сопротивление (катушки)  $R_{из}$  – эквивалентное сопротивление изоляции сети.

Из (1) получается минимальное допустимое (для безопасной, правильной работы схемы) значение эквивалентного сопротивления изоляции сети

$$R_{из} = R_p \cdot \frac{1,05 \cdot E - U_{отпуск}}{U_{отпуск}}. \quad (2)$$

Эта формула рекомендована [1] для определения уставки устройств контроля изоляции цепей оперативного постоянного тока.

Однако представляется целесообразным рассмотреть и других возможных случаев ложной работы релейных цепей, а также угроз поражения человека электрическим током, возникновения пожара и взрыва, вызванных понижением уровня изоляции. Из анализа, проведенного в следующей главе, вытекают дополнительные критерии.

### **Определение условий угрозы поражения человека электрическим током, возникновения пожара и взрыва**

Для определения угрозы поражения человека электрическим током, а также возникновения пожара и взрыва необходимо принять со-

ответствующие критерии, например превышение допустимого установившегося значения напряжения прикосновения или тока идущего через тело.

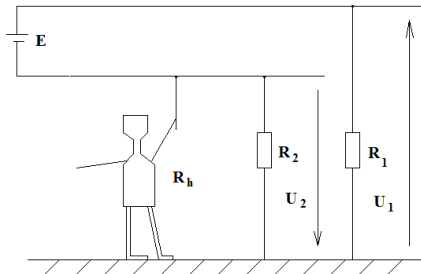


Рис.2. Прикосновение человека (сопротивление тела человека «рука-ноги»  $R_h = R_u$ ) к отрицательному полюсу сети

В первом случае (рис. 2) эта критериальная величина  $U_{\text{ч}}$  дана формулами: при прикосновении к положительному полюсу

$$U_1 = \frac{\frac{R_u \cdot R_1}{R_u + R_1}}{\frac{R_u \cdot R_1}{R_u + R_1} + R_2} \cdot E \quad (3)$$

а к отрицательному полюсу

$$U_2 = \frac{\frac{R_u \cdot R_2}{R_u + R_2}}{\frac{R_u \cdot R_2}{R_u + R_2} + R_1} \cdot E \quad (4)$$

где  $E$  - напряжение источника,  $R_1$  – сопротивление изоляции положительного полюса,  $R_2$  – сопротивление изоляции отрицательного полюса,  $R_u$  - установившееся сопротивление тела человека. Из формул (3), (4) получаются значения сопротивления  $R_1$  в зависимости от  $R_2$ , при которых напряжение на теле человека превышает максимальный допустимый уровень  $U_{\text{ч.макс}}$ :

$$R_1 < \frac{R_u \cdot R_2}{R_u + R_2} \cdot \frac{E - U_{\text{ч.макс}}}{U_{\text{ч.макс}}}, \quad (5)$$

при прикосновении к отрицательному полюсу

$$R_1 > \frac{R_u \cdot R_2 \cdot U_{\text{ч.макс}}}{R_u \cdot (E - U_{\text{ч.макс}}) - R_2 \cdot U_{\text{ч.макс}}}, \quad (6)$$

при прикосновении к положительному полюсу.

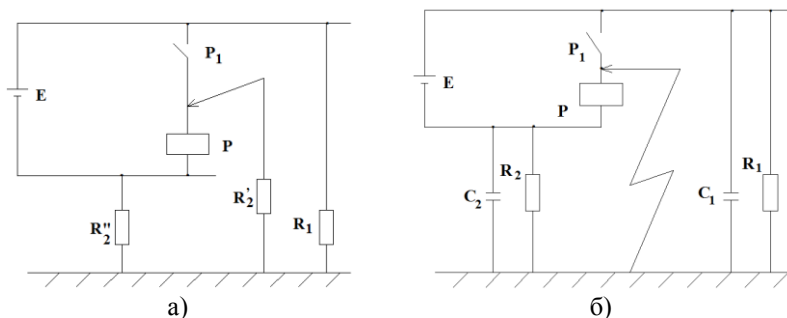
Данные выше условия изображены на плоскости ( $R_2, R_1$ ) на рис. 6.

Исследования [1] показали, для воспламенения (возгорания) и поддержания огня минимальная мощность, выделяемая в месте повреждения изоляции, должна быть порядка 60 Вт. В сети 230 В требуемый для этого ток короткого замыкания на землю равен не меньше 0,26 А, но такое значение тока возможно только при эквивалентном сопротивлении изоляции сети ниже 1 кОм. Поэтому угроза пожара не является критическим условием для оценки состояния изоляции сетей постоянного тока и в дальнейшем анализе не учтена.

### ***Неправильная работа аппаратов***

Повреждение изоляции и чрезмерная емкость сети относительно земли являются частыми причинами неправильной (ложной) работы аппаратов (реле, контакторов и т.д.).

К этим случаям принадлежат отсутствие (нужного) срабатывания, ложное (ненужное) срабатывание и отсутствие отпускания аппарата. Избранные вышеупомянутые ситуации показаны на рис. 4, а, б. Другие примеры этих нежеланных происшествий рассмотрены в [2].



*Рис.4. а) ложное (ненужное) срабатывание (при разомкнутом контакте  $P_1$ ) или отсутствие отпускания (после размыкания контакта  $P_1$ ) аппарата  $P$  из-за замыкания на землю зажима его катушки через переходное сопротивление  $R_2'$ ; б) ложное срабатывание аппарата  $P$  из-за перезаряда емкостей сети после замыкания на землю зажима его катушки*

В схеме на рис. 4, а реле  $P$  может не отпустить после размыкания контакта  $P_1$ , если ток проходящий через сопротивления  $R_1, R_2$  и катушку выше тока возврата этого аппарата. На рис. 4, б представлен случай ложного срабатывания аппарата  $P$  из-за перезаряда емкостей сети после замыкания на землю зажима его катушки. Емкость  $C_2$  раз-

ряжается и одновременно емкость  $C_2$  заряжается, причем оба тока проходят через катушку в одинаковом направлении. В итоге этот суммарный экспоненциально затухающий емкостный ток может вызвать ложное срабатывание данного аппарата.

**Критерии выявления риска ложной работы аппаратов**

При замыкании (для упрощения рассмотрено глухое короткое замыкание) на землю зажима катушки аппарата (рис. 4, б) напряжение  $U_2$  отрицательного полюса (с момента замыкания  $t=0$  оно равно напряжению на катушке) экспоненциально затухает с начального значения  $U_2(0)$  до установившегося уровня  $U_2(\infty)$  по закону

$$U_2(t) = U_2(0) \cdot e^{-t/T} + U_2(\infty) \cdot (1 - e^{-t/T}), \quad (7)$$

где  $T = (C_1 + C_2) \cdot \frac{R_{из} \cdot R_p}{R_{из} + R_p}$  постоянная времени эквивалентной цепи

относительно зажимов короткого замыкания для  $t > 0$ .

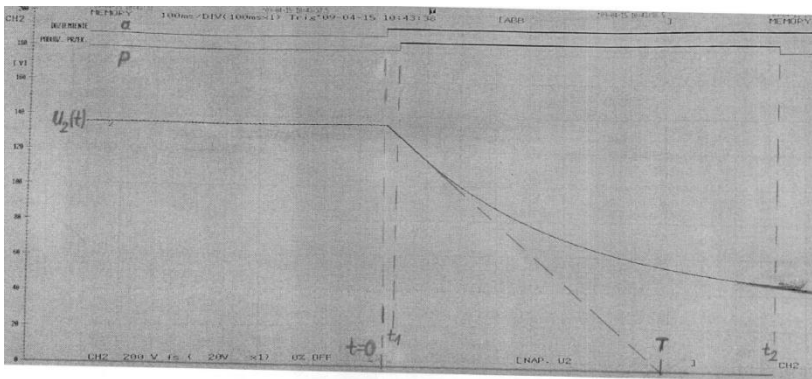


Рис.5. Осциллограмма ложного срабатывания реле (схема на рис. 4, б) в результате глухого замыкания на землю зажима его катушки, а - замыкание на землю в момент  $t=0$ ,  $P$  – положение контактов реле ( $t_1$  – замыкание,  $t_2$  – размыкание)

Реле возбуждается, если напряжение на его катушке в момент  $t_1$  ( $t_1$  – время срабатывания реле) превышает напряжение срабатывания  $U_p$ . Из этого условия

$$U_2(t=t_1) > U_p \quad (8)$$

получаются все значения параметров изоляции ( $R_1, R_2$ ), при которых возможно ложное срабатывание данного аппарата. Точно определить это множество значений ( $R_1, R_2$ ) для этого аппарата можно только при

известном значении суммарной емкости сети  $C_1 + C_2$ .

В установившемся режиме сети с пониженным уровнем изоляции нельзя исключать угрозы неправильной работы аппаратов объясненной на рис. 4, а. Так как ток отпускания реле ниже тока его возбуждения, в рассмотрение принимается отсутствие отпускания (после размыкания контакта  $P_1$ ) аппарата  $P$  из-за замыкания на землю зажима его катушки. Чаще всего переходное сопротивление  $R_2$  равно приблизительно нулю. В этом случае из условия  $U_2 > U_{отпуск}$ , где  $U_2$  - напряжение на катушке после размыкания контакта  $P_1$ ,  $U_{отпуск}$  - напряжение отпускания реле, можно определить все значения параметров изоляции ( $R_1$ ,  $R_2$ ), при которых возможна рассматриваемая угроза:

$$R_1 \leq \frac{E - U_{отпуск}}{U_{отпуск}} \cdot \frac{R_p \cdot R_2}{R_p + R_2}. \quad (9)$$

Следует заметить, что при бесконечном значении  $R_2$  условие (9) равносильно (2). Неравенство (9), которое является вторым критерием оценки состояния изоляции кроме (5) и (6), можно выразить также другим способом. Он может оказаться более пригоден, так как устройства контроля изоляции измеряют чаще всего эквивалентное сопротивление изоляции  $R_{из}$ , а не отдельных полюсов  $R_1$  и  $R_2$ :

$$U_2 - \frac{U_{отпуск}}{R_p} \cdot R_{из} > U_{отпуск}, \quad (10)$$

причем  $U_2$  - напряжение зажима катушки относительно земли до появления замыкания на землю. Это условие можно вывести, например, с помощью теоремы Тевенина. Ток возможного глухого замыкания на землю  $I_3$  зажима катушки равен  $U_2 = I_3 \cdot (R_{из} + R_p)$ . При глухом замыкании на землю зажима катушки реле не будет отпускать, если  $I_3 < I_{отпуск} = U_{отпуск} / R_p$ . Из обоих выражений получается (10).

Другой случай неправильной работы аппарата в схеме (рис. 4, а) возможен, если  $R_2 = R_p + R_2'$  ( $R_2' = \infty$ ). Это описано подробно в [2], а в этой работе из-за недостатка места опущено.

К критериям (8) и (10) следует добавить условие выявления угрозы поражения человека при прикосновении к отрицательному полюсу (соответствующее неравенству (5)) полученное аналогично неравенству (10)

$$U_2 - \frac{U_{чмакс}}{R_ч} \cdot R_{из} > U_{чмакс}. \quad (11)$$

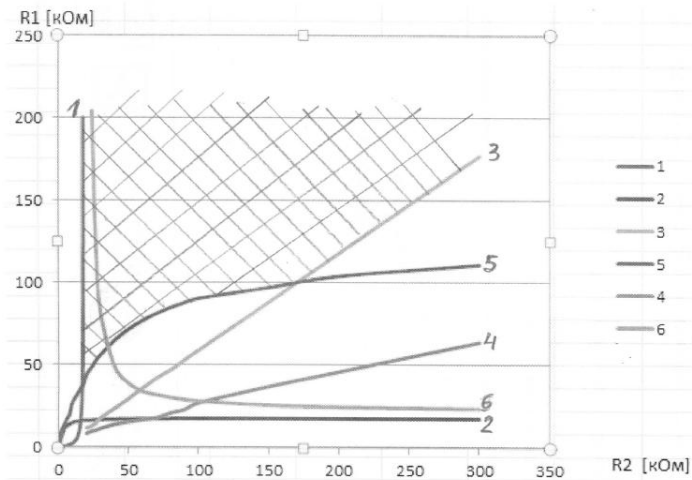
Представление упомянутых критериев в форме сравнения напря-



жений облегчает проверку и выявление соответствующих угроз. Вместо затруднительного анализа условий на плоскости ( $R_2$ ,  $R_1$ ) проще проверять данные неравенства. Их можно также проверять автоматически в специализированных релейных схемах [2].

### *Графическое изображение условий оценки уровня изоляции*

На рис. 6 показаны области (зоны) значений сопротивления изоляции соответствующие *отдельным* угрозам. Для анализа принято польское электромагнитическое реле типа R15 с параметрами:  $U_{\text{ном}}=230$  В,  $U_{\text{срабат}}=140$  В,  $U_{\text{отпуск}}=60$  В,  $R_p=35$  кОм,  $t_{\text{срабат}}=60$  мс.



*Рис. 6. Границы областей (зон) значений сопротивлений изоляции соответствующие следующим угрозам: 1,2 – поражение человека при прикосновении к положительному/ отрицательному полюсу, 3- ложное срабатывание реле в результате глухого замыкания на землю зажима его катушки ( $C_1+C_2=50$  мкФ), 4- то же для ( $C_1+C_2=5$  мкФ), 5- отсутствие отпущения реле, 6 - порог сигнализации понижения эквивалентного сопротивления изоляции  $R_{\text{из}}=22$  кОм.*

На рисунке заштрихована зона, в которой все вышеупомянутые угрозы отсутствуют.

Если в данной сети подключены аппараты разного типа, то для каждого из них надо начертить характеристики соответствующие этим угрозам и указать зону безопасной работы. Общая часть всех этих областей есть искомая зона значений сопротивлений изоляции, при которых не наступит поражение человека при прикосновении к полюсу сети, а также не появится риск неправильной работы аппаратов даже в

случае глухого замыкания на землю в любой точке сети.

### ***Выводы***

Автором принят подход, что устройства контроля изоляции должны сигнализировать о всех значениях сопротивления изоляции, при которых в случае: а) прикосновения человека к любому полюсу ток через его тело превысит допустимый уровень; б) возникновения глухого замыкания на землю в любой точке сети появится угроза возникновения пожара и взрыва, а также неправильной работы электрических аппаратов. Наоборот, ни при каких других значениях сопротивления изоляции эти устройства срабатывать не должны.

Из рис. 6 видно, что устройства измеряющие эквивалентное сопротивление изоляции не в состоянии выполнить эти условия, так как их характеристика срабатывания (гипербола 6 дана уравнением  $R_{из} = (R_1 \cdot R_2) / (R_1 + R_2)$ ) значительно отличается от контура заштрихованной зоны, в которой все вышеупомянутые угрозы отсутствуют. Поэтому предлагается воспользоваться этими устройствами по-другому – для выявления всех вышеупомянутых угроз они должны проверять критерии данные неравенствами (8), (10) и (11). Для цифровых устройств контроля изоляции задача эта вполне выполнима, если им ввести необходимые номинальные параметры аппаратов. Устройства эти способны в процессе измерения сопротивления изоляции определять также суммарную емкость сети.

### ***Список литературы***

1. Hofheinz W. Protective Measures with Insulation Monitoring, VDE Verlag Berlin-Offenbach, 2nd edition 2000.
2. Olszowiec P. Insulation Measurement and Supervision in Live AC and DC Unearthed Systems Lecture Notes in Electrical Engineering, Vol. 167, Springer 2012.

УДК 681.586

## **АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ГЕТЕРОГЕННЫХ ВЛАЖНЫХ СИСТЕМ**

***П.И. Каландаров, Р.К. Азимов, Ш.М. Машарипов,  
Б. Хаитов***

*Ташкентский государственный технический университет  
Polvon\_1955@yahoo.com*