

**П.В. Григоренко, О.В. Мельниченко**

*Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация*

## **ВЫБОР СПОСОБА КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВЫХ ГРУПП ЭЛЕКТРОВОЗА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В ЭКСПЛУАТАЦИИ**

**Аннотация.** Согласно указу президента Российской Федерации от 7 мая 2018 г. № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» предусмотрено увеличение пропускной способности Байкало-Амурской и Транссибирской железнодорожных магистралей в полтора раза. Одним из способов достижения этой цели является исключение простоев электровозов переменного тока на перегоне вследствие пробоя изоляции и отказа работы силовых групп. Это возможно с помощью разработки способа контроля состояния изоляции силовых групп электровоза переменного тока в эксплуатации. Такой подход позволяет оценивать исправность изоляции силовых групп электровоза и своевременно проводить ремонт исходя из её текущего состояния. В статье рассмотрены способы контроля состояния изоляции силовых групп электровоза переменного тока в депо-ских условиях, а также их достоинства и недостатки, по результатам сравнения которых произведен выбор способа контроля состояния изоляции значительно превосходящий другие. Выбранный способ рекомендован для контроля состояния изоляции силовых групп электровоза переменного тока в эксплуатации.

**Ключевые слова:** изоляция, сопротивление, эксплуатация, электровоз переменного тока, силовые группы электровоза, контроль сопротивления изоляции в эксплуатации.

**P.V. Grigorenko, O.V. Melnichenko**

*Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation*

## **SELECTION OF A METHOD FOR MONITORING THE INSULATION CONDITION OF AC ELECTRIC LOCOMOTIVE POWER GROUPS IN OPERATION**

**Abstract.** According to the Decree of the President of the Russian Federation dated May 7, 2018 No. 204 "On national goals and strategic objectives of the development of the Russian Federation for the period up to 2024", it is planned to increase the capacity of the Baikal-Amur and Trans-Siberian railway by one and a half times. Today it is important to increase the capacity of railways. One of the ways to achieve this goal is to eliminate downtime of alternating current electric locomotives on the stretch following insulation breakdown and failure of power groups. This is possible by developing a method for monitoring the insulation condition of the power groups of an alternating current electric locomotive in operation. This approach makes it possible to assess the serviceability of the insulation of the electric locomotive power groups and carry out repairs in a timely manner based on its current condition. The article discusses the methods of monitoring the insulation condition of alternating current electric locomotive power groups in depot conditions, as well as their advantages and disadvantages, according to the results of comparison of which the choice of a method for monitoring the insulation condition is significantly superior to others. The chosen method is recommended for monitoring the insulation condition of the power groups of an alternating current electric locomotive in operation.

**Keywords:** insulation, resistance, alternating current electric locomotive, electric locomotive power groups, insulation resistance control in operation.

### **Введение**

Надежная эксплуатация электровоза переменного тока обеспечивается только при правильной работе его силовых групп, невозможной без качественной изоляции. Ухудшение состояния изоляции приводит к ее пробоям, что является аварийным процессом, при котором невозможна дальнейшая эксплуатация электровоза из-за отказа работы силовых групп и вероятности возникновения пожара. В настоящее время на отечественных электровозах переменного тока отсутствует контроль за состоянием изоляции силовых групп в эксплуатации, что могло бы решить значительную часть проблем связанных с вынужденной остановкой электровоза вследствие повреждения электрооборудования. При возникновении таких ситуаций приходится оперативно устранять неисправность и вызывать подталкивающий локомотив, все это время электровоз простаивает на перегоне снижая его пропускную способность. Только за

2020 год на Восточно-Сибирской железной дороге дирекцией тяги зафиксировано 650 случаев отказов электрооборудования и 430 случаев отказов ТЭД по причине пробоя изоляции силовых групп. Значительные расходы ОАО «РЖД» приходится на проведения ремонтов, занятие путей неисправными электровозами и вызов подталкивающего локомотива.

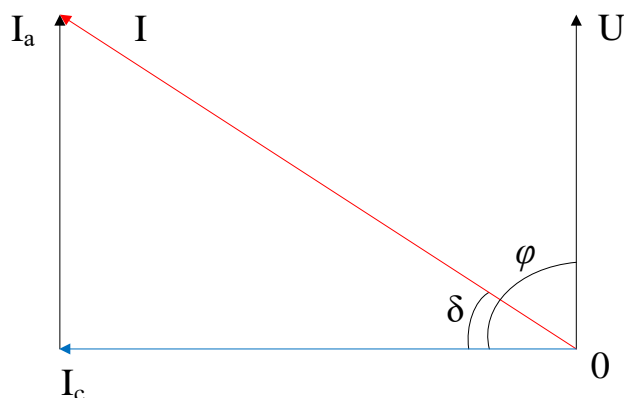
В настоящее время контроль состояния изоляции силовых групп электровоза производится во время проведения планово-предупредительного ремонта, что подразумевает простой электровоза в депо. Такой подход неэффективен, так как состояние изоляции может резко измениться в процессе эксплуатации из нормального в непригодное из-за воздействия механических, электрических и тепловых нагрузок [1]. Такие нагрузки разрушают изоляцию, что в определенный момент приводит к её пробоям, и как следствие, остановке электровоза на перегоне и необходимости проведения внепланового ремонта. Все это снижает пропускную способность железной дороги и коэффициент технической готовности локомотива. Помимо этого, осуществляя контроль состояния изоляции силовых групп электровоза переменного тока в эксплуатации возможно продлить срок ее службы, известно, что перегрев изоляции на  $8^{\circ}\text{C}$  уменьшает срок ее службы в 2 раза и, соответственно, срок службы электрооборудования [2].

В связи с этим важно непрерывно контролировать состояние изоляции в процессе эксплуатации электровоза переменного тока. Такой подход позволяет оценивать исправность изоляции силовых групп электровоза и своевременно проводить ремонт исходя из её текущего состояния. Поэтому в данной статье рассматриваются способы контроля состояния изоляции силовых групп электровоза переменного тока, из которых выбирается наилучший для применения в эксплуатации.

### Способы контроля состояния изоляции

Существует несколько способов контроля состояния изоляции, рассмотрим каждый из них в отдельности.

Способ измерения тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$  [2]. Этот способ базируется на явлении электрической поляризации, при которой происходит рассеяние энергии, характеризующееся величиной угла диэлектрических потерь  $\delta$ . При увлажнении или повреждении изоляции увеличивается активная составляющая тока утечки  $I_a$ , проходящего через изоляцию, что вызывает увеличение угла диэлектрических потерь  $\delta$  и, соответственно, тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$  (рис. 1).



$I_c$  – ёмкостная составляющая тока, протекающего через изоляцию;  $I_a$  – активная составляющая тока, протекающего через изоляцию;  $I$  – полный ток, протекающий через изоляцию;  $\delta$  – угол диэлектрических потерь;  $\varphi$  – угол фазного сдвига между напряжением и током;  $U$  – напряжение на изоляции

**Рисунок 1 – Векторная диаграмма токов через изоляцию с потерями при способе измерения тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$**

Схему замещения изоляции в данном случае можно представить как цепочку с параллельным соединением идеального конденсатора без потерь  $C_p$  и резистора  $R$  (рис. 2).

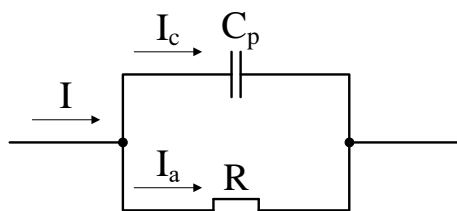
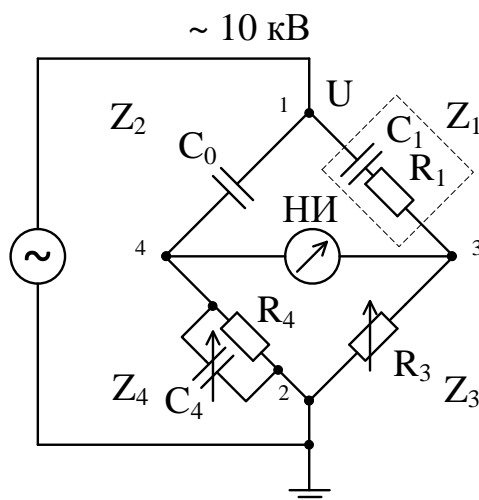


Рисунок 2 – Схема замещения изоляции с потерями при способе измерения тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$

Измерения производятся с помощью моста переменного тока Шеринга [3] (рис. 3).



$Z_1, Z_2, Z_3, Z_4$  – плечи моста;  $C_0$  – ёмкость образцового (эталонного) конденсатора;  $C_1$  – ёмкость испытываемой изоляции;  $C_4$  – регулируемый конденсатор;  $R_1$  – активное сопротивление испытываемой изоляции;  $R_3$  – регулируемое сопротивление;  $R_4$  – нерегулируемое сопротивление; НИ – нуль-индикатор переменного напряжения

Рисунок 3 – Мост переменного тока Шеринга для измерения тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$

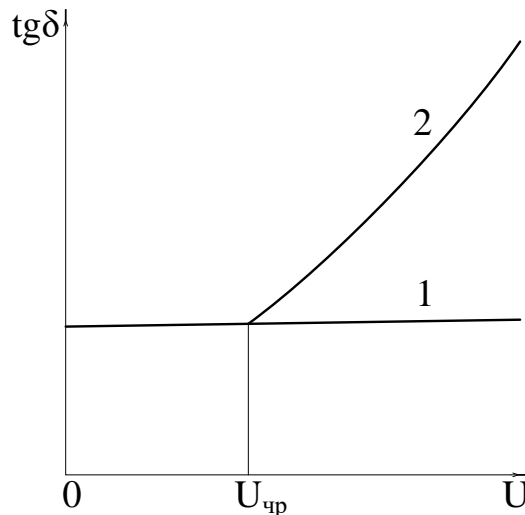
Согласно схеме замещения изоляции (рис. 2), при увеличении тока утечки  $I_a$ , проходящего через изоляцию вследствие её увлажнения или повреждения, в сопротивлении  $R$  происходит рассеивание энергии (мощности)  $P$

$$P = U \cdot I_a \quad (1)$$

Учитывая, что  $\text{tg}\delta = I_a/I_c$  (рис. 1) получаем

$$P = U \cdot I_c \cdot \text{tg}\delta \quad (2)$$

Соответственно, диэлектрические потери, т.е. рассеивание энергии на резисторе в тепло, прямо пропорциональны углу диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$ . Именно поэтому измерение угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$  позволяет судить о степени повреждения изоляции, так как распределенные дефекты (увлажнение или ионизация газовых включений) вызывают увеличение диэлектрических потерь [4]. У изоляции нормального качества значение угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$  при росте напряжения остается практически неизменным. Резкий рост  $\text{tg}\delta$  свидетельствует о появлении частичных разрядов вследствие наличия дефектов, дальнейший рост напряжения при этом может привести к пробое (рис. 4).



1 – изоляция нормального качества; 2 – изоляция с дефектами;  $U_{чр}$  – напряжение появления частичных разрядов  
**Рисунок 4 – Зависимость  $tg\delta$  от напряжения для изоляции**

Рассмотрим достоинства и недостатки способа контроля состояния изоляции путем измерения тангенса угла диэлектрических потерь  $tg\delta$ .

Достоинства:

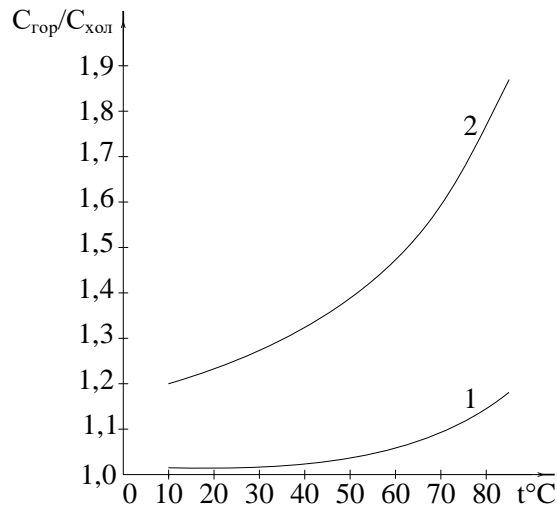
- высокая точность контроля.

Недостатки:

- сложность процесса измерения;
- значительная стоимость оборудования для измерения;
- невозможность применения в эксплуатации;
- измерение возможно только на разобранном электрооборудовании;
- точность измерения снижается из-за электростатического и электромагнитного влияния находящихся под напряжением частей электрооборудования.

Такой способ непригоден для контроля состояния изоляции силовых групп электровоза переменного тока. Рассмотрим следующий способ - измерение ёмкости изоляции [5]. Этот способ базируется на явлении электрической поляризации, при увлажнении изоляции увеличивается скорость протекания процессов поляризации, за счет появления хорошо проводящих включений, вследствие чего возрастает ёмкость изоляции. Ёмкость изоляции при неизменной температуре, есть постоянная величина, поэтому изменение ёмкости является показателем дефекта изоляции [6]. Существует несколько методов проверки качества изоляции по ёмкостным характеристикам.

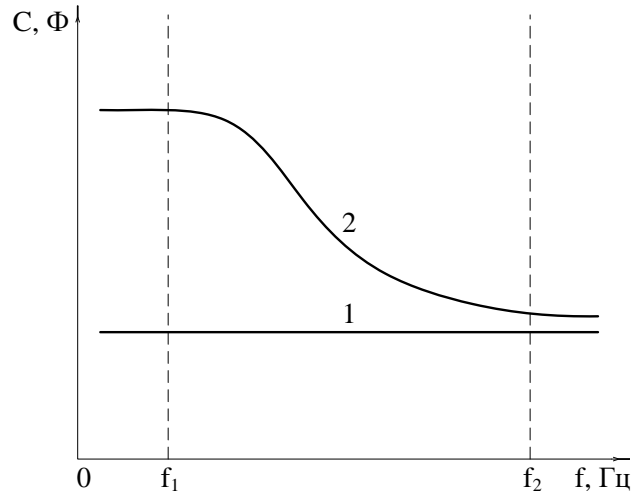
Метод «ёмкость – температура» основывается на измерении ёмкости при увеличении температуры. Считается, что если при повышении температуры на  $50^{\circ}C$  ёмкость увеличивается не более чем на 30%, то изоляцию можно считать нормальной, в противном случае – увлажненной. Зависимость ёмкости от температуры для сухой и увлажненной изоляции представлена на рисунке 5. Ёмкость в этом методе измеряют мостом Шеринга (рис.2).



1 – сухая изоляция; 2 – влажная изоляция

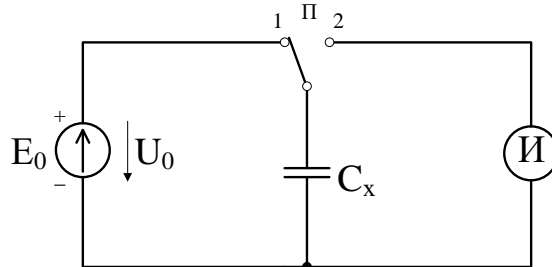
**Рисунок 5 – Кривые зависимости ёмкости изоляции от температуры**

Метод «ёмкость - частота» основывается на изменении ёмкости при различных частотах. Относительная диэлектрическая проницаемость воды во много раз больше, чем у изоляции. Поэтому при малых частотах, когда диполи частиц влаги успевают ориентироваться вдоль линий переменного электрического поля, они увеличивают ёмкость изоляции. Однако при увеличении частоты, когда диполи не успевают ориентироваться с частотой приложенного напряжения, величина ёмкости резко уменьшается (рис. 6). Ёмкость изоляции измеряют на частотах 2 и 50 Гц и определяют отношение  $C_2/C_{50}$ , которое служит показателем качества изоляции. Отношение  $C_2/C_{50}$  для неувлажненной изоляции близко к единице. Чем больше увлажнение изоляции, тем больше становится отношение  $C_2/C_{50}$ . Для измерения ёмкостей  $C_2$  и  $C_{50}$  используют прибор контроля влажности, упрощенная схема которого представлена на рисунке 7.



1 – сухая изоляция; 2 – увлажненная изоляция

**Рисунок 6 – Зависимость ёмкости изоляции от частоты приложенного напряжения**



П – переключатель;  $C_x$  – ёмкость испытываемой изоляции; И – измеритель;  $E_0$  – источник постоянного напряжения

**Рисунок 7 – Упрощенная схема прибора для контроля влажности**

В методе "емкость – время" измеряют геометрическую ёмкость  $C_G$  и емкость, отражающую процесс накопления заряда абсорбции в неоднородной изоляции  $\Delta C$ . Критерием качества изоляции является отношение  $\Delta C/C_G$ . Считается, что для нормальной изоляции отношение  $\Delta C/C_G$  не превышает 0,1, а для увлажненной изоляции отношение  $\Delta C/C_G > 0,1$ . Зависимость  $\Delta C$  и  $C_G$  от частоты приведена на рисунке 8. Упрощённая схема прибора для измерения  $\Delta C$  и  $C_G$  приведена на рисунке 9.

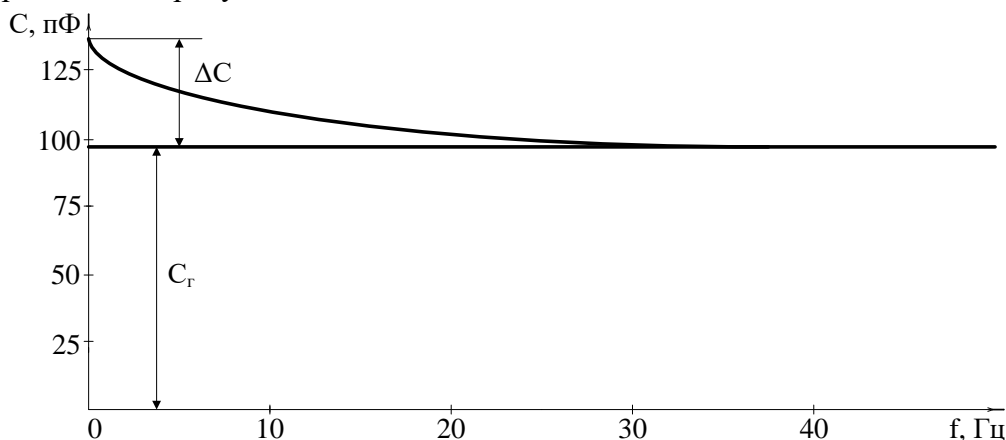
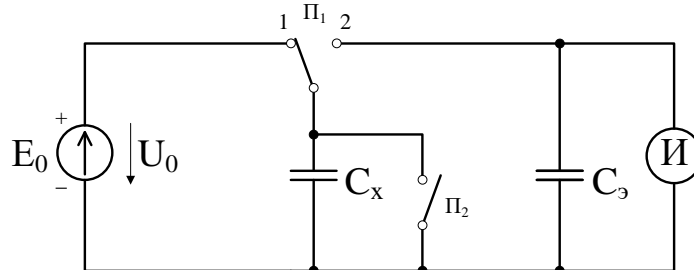


Рисунок 8 – Зависимость  $\Delta C$  и  $C_G$  от частоты для неоднородной изоляции



П – переключатель;  $C_x$  – ёмкость испытываемой изоляции; И – измеритель;  $E_0$  – источник постоянного напряжения;  $C_э$  – ёмкость эталонного конденсатора

Рисунок 9 - Упрощённая схема прибора для измерения  $\Delta C$  и  $C_G$

Рассмотрим достоинства и недостатки способа контроля состояния изоляции по ёмкостным характеристикам.

Достоинства:

- незначительная стоимость оборудования для измерения;
- разнообразие методов измерения.

Недостатки:

- точность измерения значительно ниже, чем при предыдущем способе контроля состояния изоляции (измерение тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$ );
- сложность процесса измерения;
- невозможность применения в эксплуатации;
- измерение возможно только на разобранном электрооборудовании.

Такой способ непригоден для контроля состояния изоляции силовых групп электровоза переменного тока в эксплуатации. Рассмотрим следующий способ - измерение частичных разрядов изоляции [7]. Основной причиной старения изоляции при воздействии сильного напряжения являются частичные разряды (ЧР). Они представляют собой локальные пробой ослабленных участков высоковольтной изоляции. Ослабленными или дефектными участками в изоляции являются газовые включения, возникающие вследствие растрескивания или расслоения изоляции из-за чрезмерных вибрационных или механических нагрузок, а также в результате перегрева. Относительная диэлектрическая проницаемость газовых включений значительно меньше, чем у диэлектрика [8]. Так как напряженность электрического поля обратно пропорциональна диэлектрической проницаемости, напряженность электрического поля в газовых включениях значительно больше чем в изоляции, что приводит к пробую при повышении

напряжения (3). Такой процесс называют частичным пробоем (частичным разрядом), так как при пробое газового включения, оставшаяся неповрежденная часть изоляции продолжает выполнять свои функции. При частичном разряде рассеивается лишь незначительная часть энергии, поэтому скорость разрушения изоляции зависит от интенсивности возникновения частичных разрядов.

$$E = U/(d + \epsilon_r \cdot d_0), \quad (3)$$

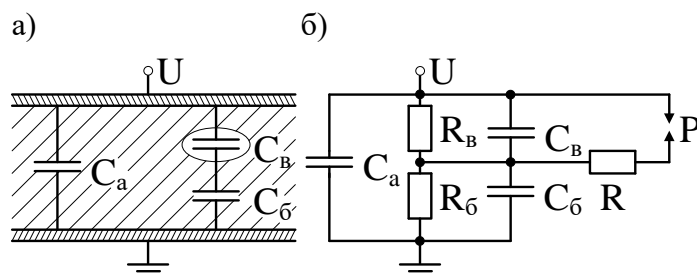
где  $E$  – напряженность электрического поля В/м;

$d$  – расстояние между обкладками конденсатора, м;

$d_0$  – расстояние между обкладкой и диэлектриком, м;

$\epsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость.

Схема изоляции с газовым включением и его схема замещения при частичном разряде представлена на рисунке 10.



$R_b, C_b$  – сопротивление утечки и ёмкость газового включения;  $R_{b'}, C_{b'}$  – сопротивление утечки и ёмкость барьера, т.е. участка изоляции, расположенного последовательно с газовым включением;  $C_a$  – ёмкость всей остальной изоляции;  $R$  – сопротивление канала разряда газового включения;  $P$  – разрядник, срабатывание которого имитирует пробой газового включения

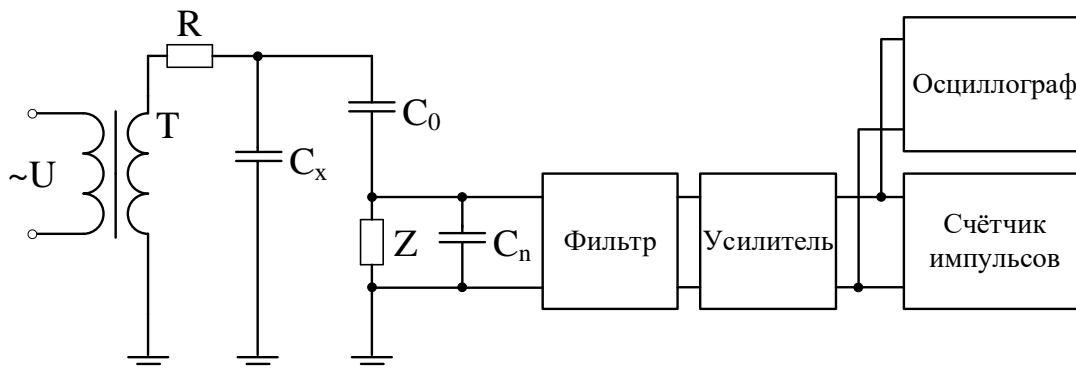
**Рисунок 10 – Схема изоляции с газовым включением (а) и его схема замещения при ЧР (б)**

Существует несколько методов обнаружения частичных разрядов:

**Акустический метод.** Основан на применении сверхчувствительных микрофонов, которые улавливают высокочастотные звуковые волны. Такой метод позволяет определять наличие частичных разрядов на расстоянии, но в то же время затрудняется определение места их возникновения и возможность их отделения от помех.

**Электромагнитный метод.** Позволяет обнаружить частичный разряд с помощью направленного приемного сверхвысокочастотного антенного устройства. Такой метод позволяет определять наличие частичных разрядов на расстоянии, но в то же время затрудняется возможность их отделения от помех.

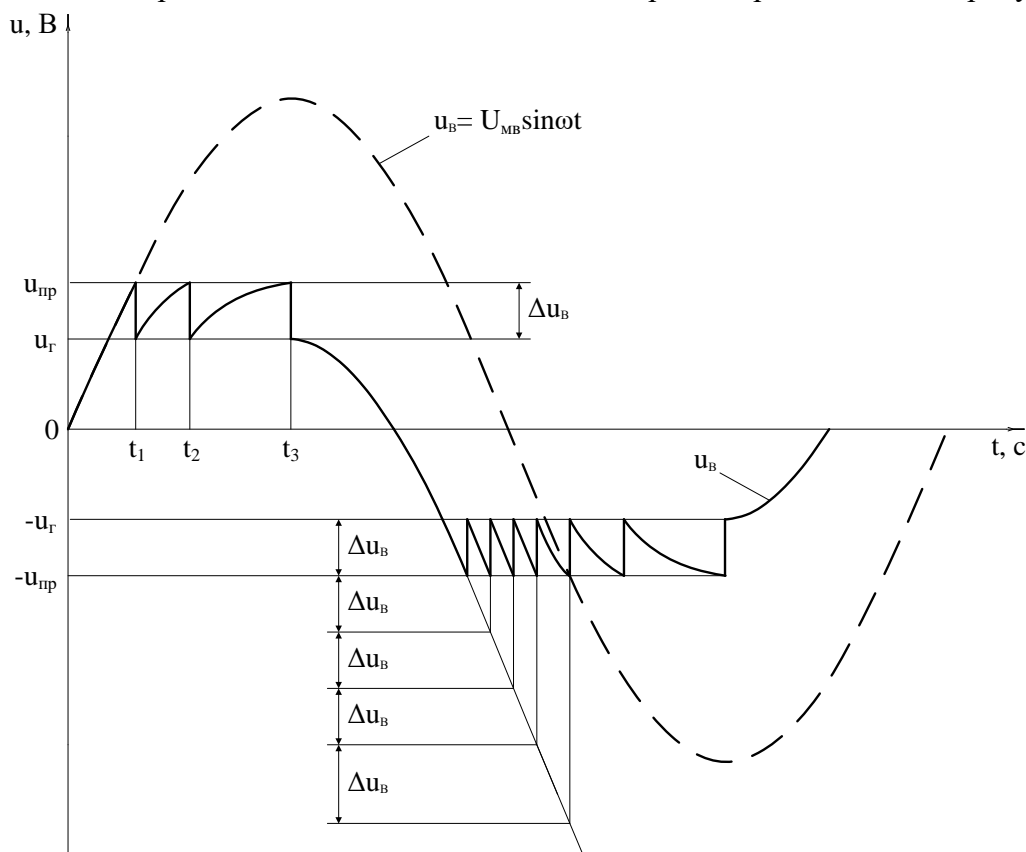
**Электрический метод** - самый точный и востребованный. Заключается в регистрации импульсов тока отличных от фоновых. Позволяет определять место возникновения частичных разрядов и их интенсивность. Принципиальная схема измерения интенсивности частичного разряда в испытуемой изоляции изображена на рисунке 11.



$C_0$  – разделительный конденсатор;  $C_x$  – ёмкость испытуемой изоляции;  $C_n$  – собственная ёмкость входных цепей измерительной части установки;  $Z$  – измерительный шунт;  $T$  – высоковольтный трансформатор;  $R$  – защитное сопротивление

**Рисунок 11 – Принципиальная схема измерения интенсивности ЧР в испытуемой изоляции**

Изменение напряжения на газовом включении  $u_B$  при ЧР представлено на рисунке 12.



$U_{пр}$  – напряжение пробоя;  $U_г$  – напряжение гашения, при котором канал разряда обрывается и гаснет;  $t_1, t_2, t_3$  – время возникновения ЧР;  $\Delta u_B$  – изменение напряжения на газовом включении;  $u_B$  – напряжение на газовом включении

**Рисунок 12 – Изменение напряжения на газовом включении  $u_B$  при ЧР**

Рассмотрим достоинства и недостатки способа контроля состояния изоляции путём измерения частичных разрядов.

Достоинства:

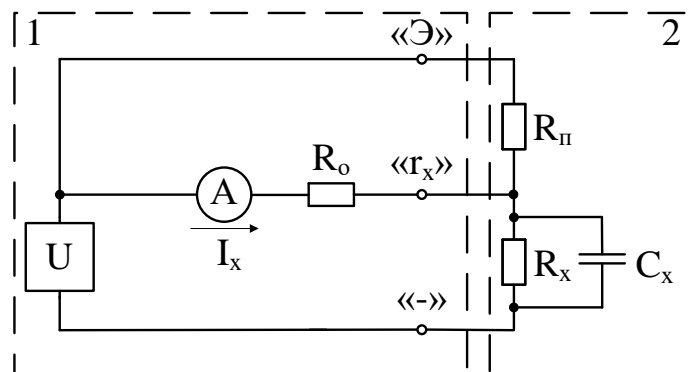
- относительная простота процесса измерения;
- незначительная стоимость оборудования;
- разнообразие методов измерения;
- возможность применения в эксплуатации.

Недостатки:

- точность измерения значительно ниже, чем при предыдущем способе контроля состояния изоляции (измерение ёмкости изоляции);
- относительная низкая помехозащищённость;
- ограниченный радиус контроля.

Такой способ непригоден для контроля состояния изоляции силовых групп электровоза переменного тока в эксплуатации. Рассмотрим следующий способ - измерение сопротивления изоляции [9]. Величина сопротивления свидетельствует о наличии сквозных проводящих путей изоляции. Выводы о наличии дефекта изоляции делаются на основании сравнения полученной величины сопротивления с заводским значением или результатом предыдущего измерения. Измерения осуществляются мегаомметром (рис. 13).





1 – мегаомметр; 2 – испытываемая изоляция;  $R_x$ ,  $C_x$  – сопротивление и ёмкость испытываемой изоляции;  $R_\pi$  – сопротивление цепей экранирования;  $R_0$  – образцовый резистор;  $U$  – источник напряжения;  $A$  – измеритель тока; «Э» - вывод, предназначенный для присоединения цепей экранирования; «Г<sub>х</sub>» - вывод, предназначенный для измерения сопротивления изоляции; «-» - вывод на минус

**Рисунок 13 – Схема измерения мегаомметром**

При приложении к изоляции постоянного напряжения в ней возникают процессы поляризации. Данные процессы рассматриваются по постоянной времени  $T$ , как быстрая и медленная поляризация [10]. Поляризационные явления в изоляции возникают в результате ее увлажнения или естественного старения. При измерении сопротивления изоляции на показания прибора влияют только процессы медленной поляризации, так как для измерения быстрой поляризации, нужны более современные приборы, фиксирующие ее при длительности порядка нескольких миллисекунд. В основном постоянная времени  $T$  составляет меньше одной минуты, это означает, что значение сопротивления будет установившимся примерно через одну минуту с времени начала приложения постоянного напряжения. По установившемуся значению сопротивления можно судить о степени старения и увлажненности изоляции, по коэффициенту поляризации и коэффициенту абсорбции, соответственно.

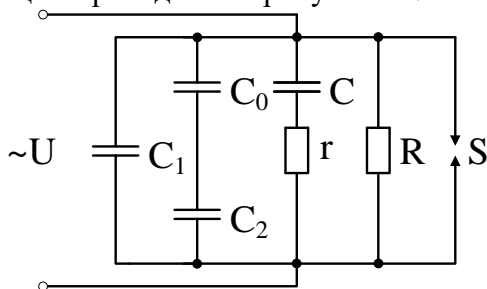
Коэффициент поляризации  $P$  (4) представляет собой отношение сопротивления изоляции, измеренного через 1 и 10 минут после подключения мегаомметра с установленным диапазоном измерения 2500 В. Чем меньше значение, тем больше изношена изоляция, коэффициент не должен быть меньше 2.

$$P = R_{10}/R_1 \quad (4)$$

Коэффициент абсорбции  $K_{аб}$  (5) представляет собой отношение сопротивления изоляции, измеренного через 15 и 60 секунд после подключения мегаомметра. При хорошей и сухой изоляции коэффициент абсорбции составляет 1,5-2, а для увлажненной приближается к единице.

$$K_{аб} = R_{60}/R_{15} \quad (5)$$

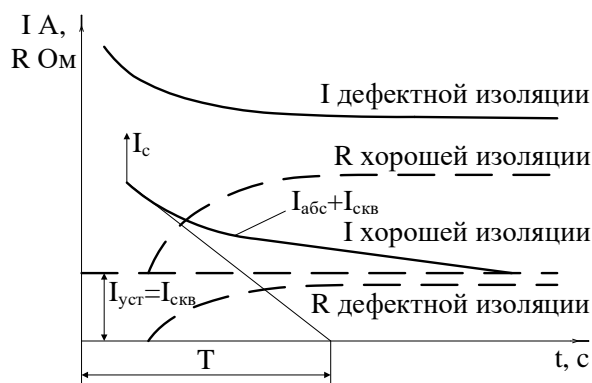
Схема замещения изоляции приведена на рисунке 14.



$C_0$  – ёмкость воздушного включения;  $C_2$  – ёмкость той части изоляции, которая пересекается силовыми линиями, проходящими через воздушное включение;  $C_1$  – ёмкость остальной части изоляции;  $C$  – абсорбционная ёмкость;  $r$  – сопротивление абсорбции;  $R$  – сопротивление изоляции току сквозной проводимости;  $S$  – ветвь, определяющая разрядное напряжение изоляции

**Рисунок 14 – Схема замещения изоляции**

Зависимость тока и сопротивления изоляции от времени приложения напряжения представлена на рисунке 15.



$I_c$  – ток смещения;  $I_{абс}$  – ток абсорбции;  $I_{скв}$  – ток сквозной проводимости;  $I_{уст}$  – установившееся значение тока;  $T$  – постоянная времени

**Рисунок 15 – Зависимость тока и сопротивления изоляции от времени приложения напряжения**

Рассмотрим достоинства и недостатки способа контроля состояния изоляции путём измерения сопротивления.

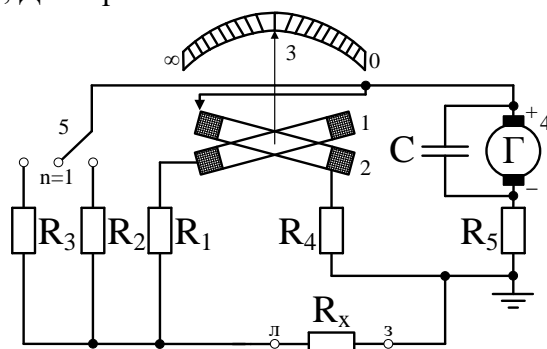
Достоинства:

- относительная простота процесса измерения;
- незначительная стоимость оборудования;
- возможность применения в эксплуатации;
- точность измерения значительно выше, чем при предыдущем способе контроля состояния изоляции (измерение частичных разрядов изоляции);
- возможность определения степени увлажненности и степени старения изоляции с помощью коэффициента абсорбции и коэффициента поляризации, соответственно.

Недостатки:

- относительная низкая помехозащищенность.

Именно такой способ контроля состояния изоляции силовых групп электровоза переменного тока применяется в настоящее время. Контроль сопротивления изоляции производится при проведении планово-предупредительного ремонта в деповских условиях с помощью мегаомметров, состоящих из маломощного генератора постоянного тока, напряжением 500 – 2500 В и стрелочного или электронного прибора для отображения значения сопротивления (рис. 16). На данный момент измерения производятся мегаомметрами типа: е6-24, е6-31, ЭС0210/3-Г, МС-05, Кедр, Доктор-30Z.



1, 2 – катушки логометра; 3 – шкала прибора; 4 – генератор (индуктор); 5 – переключатель пределов;  $R_1$  – основное сопротивление;  $R_2, R_3$  – сопротивления для изменения чувствительности прибора;  $R_4, R_5$  – сопротивления 75 и 50 кОм, ограничивающие протекающий ток;  $R_x$  – сопротивление испытываемой изоляции; C – конденсатор, сглаживающий пульсации напряжения индуктора

**Рисунок 16 – Принципиальная схема мегаомметра МС-05**

## Заключение

По результатам сравнения вышеперечисленных способов контроля состояния изоляции силовых групп электровоза переменного тока, наиболее подходящим для применения в эксплуатации, является способ измерения сопротивления изоляции. Данный способ позволяет с незначительными затратами на оборудование и с достаточной точностью непрерывно контролировать состояние изоляции в эксплуатации с целью исключения возможности возникновения её пробоя и, соответственно, выхода из строя электрооборудования с последующим простоем электровоза на перегоне. Применяемые на сегодняшний день способы контроля состояния изоляции силовых групп электровоза переменного тока известны уже несколько десятков лет и считаются довольно надежными, но с учетом повышения нагрузки на электрооборудование за счёт увеличения массы перевозимых грузов и повышения мощности электровозов необходимо также совершенствовать эти способы.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Важов В.Ф., Лавринович В.А. Техника высоких напряжений / Учебник для бакалавров направления 140200 «Электроэнергетика» – ТПУ, 2014. – 263 с.: ил.
2. Серебряков А.С. Электротехническое материаловедение. Электроизоляционные материалы: Учебное пособие для вузов ж.-д. транспорта. – М.: Маршрут. 2005. – 280 с.
3. Шваб А. Измерения на высоком напряжении: Измерительные приборы и способы измерения. – 2-е изд., перераб. и доп. Пер. с нем. – М.: Энергоатомиздат, 1983, 264 с., ил.
4. Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев Б. Электротехнические материалы: Учеб. для вузов. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 384 с.
5. Сви П.М. Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 240 с.: ил.
6. Тареев Б.М. Физика диэлектрических материалов. – М.: Энергоиздат, 1982. – 320 с.
7. Изоляция высоковольтного оборудования: учеб. пособие / сост. Г.Е. Куртенков; под ред. В.И. Курец; Томский политехнический университет. – Томск: Издательство ТПУ, 2015. – 87 с.
8. Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. – Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1979. – 224 с., ил.
9. Сборник методических пособий по контролю состояния электрооборудования / Под ред. Ф.Л. Когана. – М., 1998.
10. Иерусалимов М.Е., Орлов Н.Н. Техника высоких напряжений / Под общ. ред. М.Е. Иерусалимова. – К., Издательство Киевского университета, 1967. – 444 с.

## REFERENCES

1. Vazhov V.F., Lavrinovich V.A. Tekhnika vysokikh napriazhenii [High voltage technology]. Uchebnik dlia bakalavrov napravleniia 140200 «Elektroenergetika» [Textbook for bachelors of the direction 140200 «Electric power engineering»] – TPU, 2014. – 263 p.: il.
2. Serebriakov A.S. Elektrotekhnicheskoe materialovedenie. Elektroizoliatsionnye materialy: Uchebnoe posobie dlia vuzov zh.-d. transporta [Electrical materials science. Electrical insulation materials: A textbook for universities of railway transport]. – M.: Marshrut. 2005. – 280 p.
3. Shvab A. Izmereniia na vysokom napriazhenii: Izmeritel'nye pribory i sposoby izmereniia [High voltage measurements: Measuring instruments and measurement methods]. – 2-e izd., pererab. i dop. Per. s nem. – M.: Energoatomizdat, 1983, 264 p., il.
4. Bogoroditskii N.P., Pasyнков V.V., Tareev B. Elektrotekhnicheskie materialy: Ucheb. dlia vuzov [Electrotechnical materials: Textbook for universities]. – L.: Energoatomizdat, 1985. – 384 p.
5. Svi P.M. Metody i sredstva diagnostiki oborudovaniia vysokogo napriazheniia [Methods and means of diagnostics of high voltage equipment]. – M.: Energoatomizdat, 1992. – 240 p.: il.
6. Tareev B.M. Fizika dielektricheskikh materialov [Physics of dielectric materials]. – M.: Energoizdat, 1982. – 320 p.

7. Izoliatsiia vysokovol'tnogo oborudovaniia: ucheb. posobie [Insulation of high-voltage equipment: study guide]. Sost. G.E. Kurtenkov; pod red. V.I. Kurets; Tomskii politekhnicheskii universitet [Tomsk Polytechnic University]. – Tomsk: Izdatel'stvo TPU, 2015. – 87 p.

8. Kuchinskii G.S. Chastichnye razriady v vysokovol'tnykh konstruktssiakh [Partial discharges in high-voltage structures]. – L.: Energiia. Leningr. otd-nie [Energy. Leningrad Branch], 1979. – 224 p., il.

9. Sbornik metodicheskikh posobii po kontroliu sostoianiiia elektrooborudovaniia [Collection of methodological manuals for monitoring the condition of electrical equipment]. Pod red. F.L. Kogana. – M., 1998.

10. Ierusalimov M.E., Orlov N.N. Tekhnika vysokikh napriazhenii [High voltage technology]. Pod obshch. red. M.E. Ierusalimova. – K., Izdatel'stvo Kievskogo universiteta [Kiev University Press], 1967. – 444 p.

#### **Информация об авторах**

*Григоренко Павел Владимирович* – студент кафедры электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: [grigorenko.pv@mail.ru](mailto:grigorenko.pv@mail.ru)

*Мельниченко Олег Валерьевич* - д.т.н., профессор, заведующий кафедры электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: [olegmelnval@mail.ru](mailto:olegmelnval@mail.ru)

#### **Information about the author**

*Pavel Vladimirovich Grigorenko* - student of the Subdepartment of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: [grigorenko.pv@mail.ru](mailto:grigorenko.pv@mail.ru)

*Oleg Valerevich Melnichenko* – doctor of Engineering Science, Full professor, Head of the Subdepartment of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: [olegmelnval@mail.ru](mailto:olegmelnval@mail.ru)