

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

УТВЕРЖДАЮ
Зав. кафедрой ЭСС
доцент, канд. техн. наук

_____ Ю.С. Боровиков
« ___ » _____ 2015 г.

Г.Е. Куртенков

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
НАПРЯЖЕНИЯ ПО ГИРЛЯНДЕ ПОДВЕСНЫХ
ИЗОЛЯТОРОВ ПРИ НАЛИЧИИ ДЕФЕКТНЫХ
ЭЛЕМЕНТОВ. СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ ГИРЛЯНДЫ.
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ШТАНГИ**

Учебно-методическое пособие по выполнению лабораторной работы
по курсу «Изоляция электротехнического оборудования высокого
напряжения» для бакалавров, обучающихся по направлению
140400 «Электроэнергетика и электротехника»

Томск 2015 г.

УДК 621.315

Исследование распределения напряжения по гирлянде подвесных изоляторов при наличии дефектных элементов. Схема замещения гирлянды. Измерительные штанги: Учебно-методическое пособие по выполнению лабораторной работы по курсу «Изоляция электротехнического оборудования высокого напряжения» для бакалавров по направлению 140400 «Электроэнергетика и электротехника». – Томск: Изд. ТПУ, 2015. – 15 с.

Составитель: доцент каф. ЭСС, канд. техн. наук

Г.Е. Куртенков

Рецензент: профессор, доктор техн. наук.

В.И. Курец

Учебно-методическое пособие рассмотрено и рекомендовано к изданию методическим семинаром кафедры электроэнергетических сетей и систем _____.

Зав. кафедрой ЭСС
доцент, канд. техн. наук

Ю.С. Боровиков

Лабораторная работа

1. «Исследование распределения напряжения по гирлянде подвесных изоляторов при наличии дефектных элементов. Схема замещения гирлянды. Измерительные штанги.»

Цель работы: изучить распределение напряжения по элементам гирлянды подвесных изоляторов и на модели схемы замещения гирлянды. Определить дефектный изолятор с помощью высоковольтной измерительной штанги.

1. Краткие сведения

Напряжение по элементам гирлянды подвесных изоляторов распределяется неравномерно, т.е. на первом от провода элементе падение напряжения будет больше, чем на любом из следующих. При включении гирлянды изоляторов на переменное напряжение каждый элемент гирлянды можно представить некоторой емкостью $C = 50 \div 70$ пкФ (рис. 1).

Кроме того, каждый изолятор будет обладать некоторой емкостью по отношению к земле $C_1 = 4 \div 5$ мкФ и емкостью к проводу $C_2 = 0,5 \div 1$ пкФ. Токи, идущие через емкости C_1 и C_2 , можно назвать поперечными, а ток по цепочке емкостей C - продольным током. Если наложить продольные и поперечные емкостные токи гирлянды, то нетрудно видеть, что в ближайшем к проводу узле А величина тока, ответвляющегося на землю через емкость C_1 , будет больше величины тока, протекающего от провода через емкость C_2 .

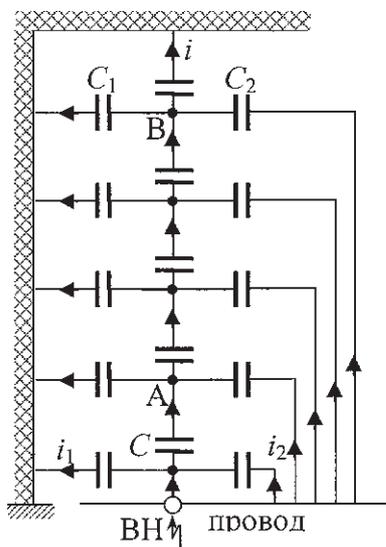


Рис.1. Схема замещения гирлянды подвесных изоляторов

Поэтому продольный ток во втором от провода изоляторе гирлянды будет меньше продольного тока, протекающего в первом изоляторе. В последних, ближайших к траверсе, изоляторах гирлянды соотношение величины емкостных токов на землю и на провод может оказаться другим: поперечные токи на землю, оттекающие от узла В через емкость C_1 , могут оказаться меньше поперечных токов от провода через емкость C_2 ; разность их увеличит продольный ток, протекающий через емкость изолятора, ближайшего к проводу, вследствие чего падение напряжения на

нем возрастает.

Степень неравномерности распределения напряжения ΔU_i по элементам гирлянды зависит, главным образом, от отношения C_1/C . Чем меньше это отношение, тем, очевидно, равномерней будут нагружены изоляторы, т.е. ослабляется влияние поперечных емкостных токов гирлянды на ее продольный емкостный ток по цепочке изоляторов. Отношение C_2/C оказывает значительно меньшее влияние на распределение напряжения по элементам из-за меньшего значения C_2 по сравнению с C_1 ; однако в длинных гирляндах влияние C_2 проявляется более отчетливо, и величина ΔU_i на элементах гирлянды, ближайших к траверсе, увеличивается. Влияние емкостей на распределение напряжения можно проанализировать с помощью модели схемы замещения (рис.2).

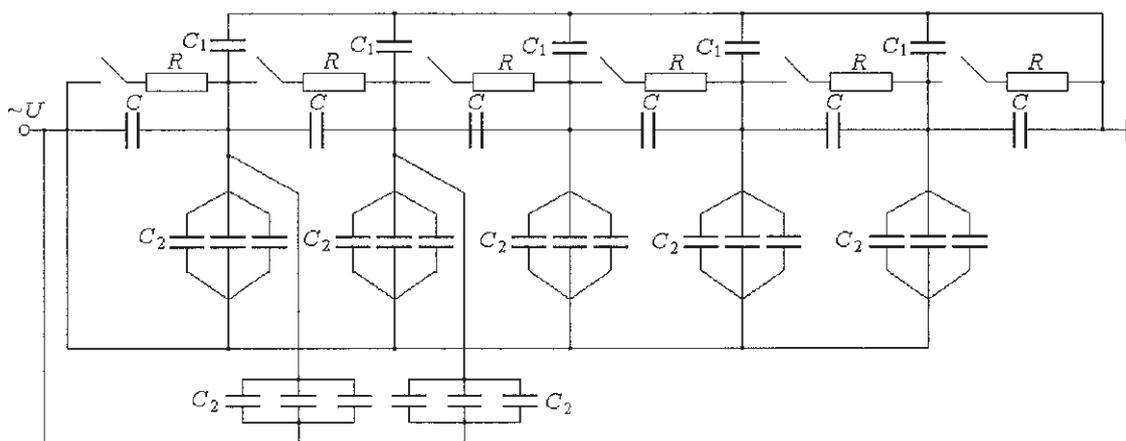


Рис.2. Принципиальная электрическая схема замещения гирлянды изоляторов для лабораторных исследований

C - емкость изолятора; C_1 - емкость изолятора на "землю";

C_2 - емкость изолятора на провод;

R - сопротивление, имитирующее полупроводящее покрытие

Чем больше емкость C изолятора гирлянды, тем равномернее распределение напряжения по ее элементам.

Высокие напряженности поля на изоляторах вблизи провода могут приводить к коронированию, вызывающему старение изоляционного тела изолятора, окислительные процессы на металлической арматуре и радиопомехи.

Имеется несколько путей улучшения распределения напряжения по элементам гирлянды:

- а) применяют изоляторы большой собственной емкости, например, стеклянные;
- б) используют изоляторы, покрытые полупроводящей глазурью, что увеличивает активную составляющую продольного тока

гирлянды и снижает влияние поперечных емкостных токов;
в) применяют защитную арматуру в виде экранных колец, рогов, восьмерок, которые монтируют на обоих или только на линейном конце гирлянды.

Измерение распределения напряжения вдоль гирлянды изоляторов в эксплуатации производится с помощью высоковольтных контрольных или измерительных штанг.

Существует несколько типов штанг.

Жужжащая штанга используется для качественного контроля изоляторов. Она представляет из себя изоляционную ручку (штангу) с металлической вилкой на конце, которая накладывается на шапки двух соседних изоляторов гирлянды. Если изолятор не поврежден, то между одним из электродов вилки и шапкой испытуемого изолятора будет происходить искровой разряд, создающий своеобразный шум, жужжание, при поврежденном (“больном”) изоляторе такого разряда не будет.

Штанги с искровым промежутком. К концам вилки, изолированным друг от друга, присоединен небольшой шаровой разрядник. При помощи специального приспособления можно изменять расстояние между шарами. Отсутствие разряда на шарах до полного их сближения будет указывать на то, что изолятор пробит (“нулевой”).

При наличии пробитого изолятора в гирлянде замыкание через искру при измерении напряжения на одном из здоровых изоляторов может привести к перекрытию гирлянды. Во избежание таких замыканий в штангах для контроля изоляторов предусмотрен последовательно включенный с искровым промежутком конденсатор, который должен быть рассчитан на фазовое напряжение сети, где производят испытание изоляторов.

Имеется модификация штанг с нерегулируемым (постоянным) зазором между шарами искрового промежутка. В этом случае при измерении определяется не действительное значение напряжения на изоляторе гирлянды, а нижний допустимый уровень напряжения на элементах гирлянды, т.е. если измерительный промежуток пробивается, то это означает, что напряжение на изоляторе больше, чем это допускается нормами по минимальному значению. Отсутствие разряда свидетельствует о том, что напряжение на изоляторе или отсутствует, или оно меньше допустимого.

Универсальная измерительная штанга (типа ШИ-35, ШИ-110) является наиболее совершенной, и она находит наибольшее применение в условиях эксплуатации. На конструкции этой штанги мы остановимся подробнее, поскольку она используется в данной работе (рис.3).

Основными элементами штанги являются изоляционные бакелито-

вые свертываемые трубки 1 и 2 или стержень прямоугольного сечения на основе древеснослоистого пластика, измерительной головки 3, в состав которой входят измерительный прибор (милливольтметр) и щупы 4. В состав головки также входит короткая изоляционная трубка 5, внутри которой находится сопротивление 50 Мом.

При наложении щупов головки на контролируемый изолятор милливольтметр подсоединяется к нему через добавочное сопротивление параллельно. Результат измерения напряжения на изоляторе определяется по показанию стрелки на шкале прибора, имеющей пять крупных делений с ценой 5 кВ, т.е.

$$U_{\text{изол}} = \text{показание прибора} \times 5, \text{ кВ.}$$

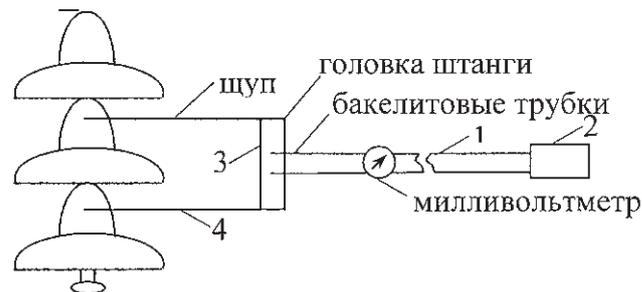


Рис. 3. Общий вид измерительной штанги

Данная штанга предназначена для контроля изоляторов и измерения сопротивления контактов.

Метод измерения потенциалов по гирлянде изоляторов (Метод Залесского М.И.)

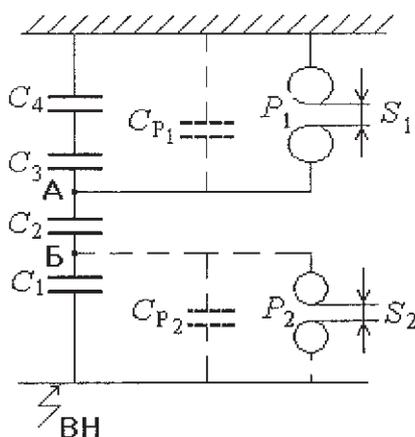


Рис.4. Упрощенная схема замещения гирлянды

C_1 - C_4 - емкости элементов гирлянды; P_1 , P_2 - разрядники шаровые, имеющие емкости C_{P1} и C_{P2} , соответственно

Суть метода состоит в следующем.

При подсоединении шарового разрядника P_1 (рис.4.) к точке А произойдет перераспределение потенциалов вдоль гирлянды, вследствие емкости шарового разрядника C_{P1} . Для уменьшения искажающего влияния М.И. Залесский предложил использовать шаровой разрядник с меньшим диаметром шаров, который при измерениях поочередно подсоединяется к каждому элементу гирлянды параллельно.

Расстояние между шарами устанавливается неизменным, т.е. пробивное напряжение разрядника P_2 остается также неизменным ($U_{\text{пр2}} = \text{const}$). Емкость шарового

разрядника P_2 в этом случае будет несколько меньше, чем C_{P_1} ($C_{P_2} < C_{P_1}$), т.к. используется разрядник с меньшими размерами. При измерениях потенциал провода повышается до момента пробоя промежутка P_2 . Относительное падение напряжения на элементе

$$a_k = \frac{U_{\text{пр}}}{U_k}, \quad (1)$$

где U_k - напряжение, приложенное к гирлянде изоляторов, при котором шаровой разрядник P_2 пробивается на соответствующем элементе гирлянды. Тогда

$$a_1 = \frac{U_{\text{пр}}}{U_1} ; \quad a_2 = \frac{U_{\text{пр}}}{U_2} \dots\dots\dots a_n = \frac{U_{\text{пр}}}{U_n}. \quad (2)$$

Для гирлянды из n изоляторов

$$a_1 + a_2 + a_3 + \dots\dots\dots + a_n = 1. \quad (3)$$

Или

$$\frac{U_{\text{пр}}}{U_1} + \frac{U_{\text{пр}}}{U_2} + \dots\dots\dots + \frac{U_{\text{пр}}}{U_n} = 1. \quad (4)$$

Откуда

$$U_{\text{пр}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{U_i}}. \quad (5)$$

Из выражений (2 и 5) находим

$$a_1 = \frac{1}{U_1 \sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{U_i}} \quad \text{или} \quad a_k = \frac{1}{U_k \sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{U_i}}. \quad (6)$$

Выражение (6) показывает, что для определения потенциалов на каждом элементе гирлянды $U_{\text{пр}}$ разрядника знать не требуется, что также уменьшает погрешность измерения.

Зная относительное падение напряжения на элементах гирлянды (в долях или в процентах) можно легко определить напряжение на изоля-

торе и потенциал на любом элементе при заданном напряжении на гирлянде или потенциале на проводе.

При наличии дефектного (“нулевого”) изолятора в гирлянде распределение напряжения по элементам гирлянды становится еще более неравномерным (рис.5), что может вызвать перекрытие гирлянды.



Рис.5. Распределение напряжения по гирлянде изоляторов без дефектного (1) и с дефектным (2) изолятором
 1 - гирлянда без дефектного изолятора;
 2 - гирлянда с дефектным изолятором (3-ий от провода)

При известных значениях поперечных емкостей C_1 и C_2 для каждого узла емкостной схемы замещения гирлянды подвесных изоляторов (рис.1) падение напряжения на k -том элементе гирлянды, считая от траверсы, в долях от приложенного напряжения

$$\Delta U_k = \frac{1}{(C_1 + C_2) \text{Sh} \alpha n} \{ C_1 [\text{Sh} \alpha n - \text{Sh} \alpha (n - k)] - C_2 [\text{Sh} \alpha (n - k) - \text{Sh} \alpha (n - k + 1)] \}, \quad (7)$$

где n - число элементов в гирлянде,

$$\alpha = \sqrt{\frac{C_1 + C_2}{C}}.$$

2. Порядок работы

1. С помощью шарового разрядника исследовать распределение напряжения по элементам гирлянды подвесных изоляторов (из фарфора или стекла). Для этого шаровой разрядник укрепляется на первом от провода изоляторе и на гирлянду подается напряжение от высоковольтного испытательного трансформатора. Напряжение, подводимое

к гирлянде, постепенно повышается до пробоя разрядника. Контроль за напряжением, подводимым к гирлянде, производится по вольтметру V_2 со стороны высокого напряжения (рис.6). У применяемого шарового разрядника нельзя изменять расстояние между шарами под напряжением, а, следовательно, и измерять распределение напряжения в абсолютных единицах. Поэтому, не изменяя расстояния между шарами разрядника, следует поочередно переставлять его с первого от провода элемента до конца гирлянды, повышая напряжение, подаваемое на гирлянду до возникновения разряда между шарами. Для каждого элемента напряжение гирлянды брать как среднее из трех значений. Результаты занести в табл. 1.

Относительную величину напряжения, приходящуюся на данный элемент, определяют по формуле (6).

Критерием правильности полученных результатов является выполнение уравнения (3)

$$\sum_{i=1}^{i=n} a_i = 1, \quad (8)$$

где n - число элементов в гирлянде.

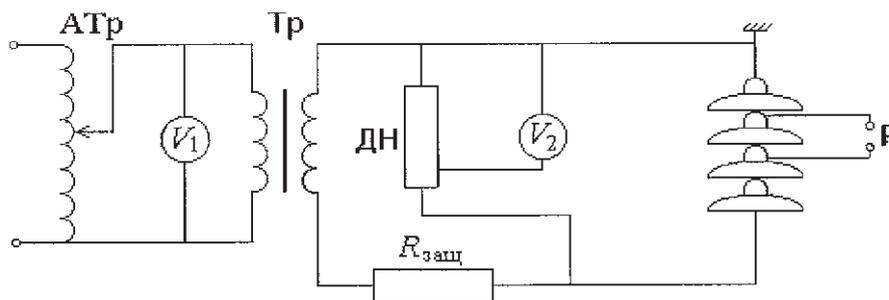


Рис.6. Схема для изучения распределения напряжения по гирлянде подвесных изоляторов

АТр - автотрансформатор; *Тр* - высоковольтный трансформатор;
R_{зашц} - защитное сопротивление; *V₁* и *V₂* - вольтметры; *P* - разрядник;
ДН - делитель напряжения

2. Укрепить на линейном конце гирлянды экранное кольцо и произвести измерение распределения напряжения по элементам гирлянды в порядке, описанном в п. 1. Результаты измерений занести в табл. 1.

3. В порядке, изложенном в п. 1 и п. 2, измерить распределение напряжения по гирлянде с дефектным изолятором. Произвести измерения для двух разных местоположений дефектного изолятора в гирлянде. Результаты измерений занести в табл. 1.

4. Измерить распределение напряжения по гирлянде с помощью универсальной измерительной штанги. Результаты занести в протокол

испытаний.

5. На модели схемы замещения гирлянды измерить распределение напряжения по цепочке емкостей для семи схем указанных в табл.2.

В схеме (рис. 6) емкость C_2 подбирается из условия равномерного распределения напряжения. Для этого необходимо, чтобы продольный ток вдоль цепочки C оставался постоянным по величине, т.е. ток, подтекающий к узлу со стороны провода i_2 , должен быть равен току, оттекающему от этого узла на землю i_1 , т.е. $i_2 = (U-U_i) \cdot \omega \cdot C_2$ должен быть равен $i_1 = U_i \cdot \omega \cdot C_1$, где U_i - потенциал на элементе. При неизменных значениях C и C_1 можно подобрать емкости C_2 в каждом узле так, что распределение напряжения по цепочке будет равномерным. Из условия равенства токов $i_1 = i_2$ следует

$$C_2 = C_1 \cdot \frac{U_i}{U - U_i}. \quad (9)$$

С другой стороны, при равномерном распределении напряжения

$$U_i = U \cdot \frac{i}{n}. \quad (10)$$

Тогда

$$C_2 = C_1 \cdot \frac{i}{n - i}, \quad (11)$$

где i - порядковый номер элемента, начиная от траверсы.

Равномерное распределение напряжения может быть достигнуто также подключением цепочки активных сопротивлений, имитирующих полупроводящие покрытия, параллельно емкостям C (рис. 2, схема 2). Величина R должна быть меньше $1/\omega C$. Тогда токи i_1 и i_2 по сравнению с током i будут малы и не окажут заметного влияния на распределение напряжения вдоль цепочки емкостей.

3. Содержание отчета

1. По данным табл. 1 построить на одном графике кривые относительного падения напряжения на элементах гирлянды в зависимости от номера элемента (по пунктам 1, 2, 3 и 4):

$$a_i, \text{отн.ед.} = f(i).$$

Таблица 1

№ элемента от провода	Показания вольтметра на высокой стороне трансформатора, U_2 , кВ				Относительное падение напряжения на элементе, a_i , отн. ед.	Примечание
	1	2	3	среднее		
	1. Гирлянда без экранного кольца					Гирлянда из 6 элементов (фарфор или стекло). Тип изолятора ПФ6-А (ПС6-А) $\sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{U_i} = \dots$
1						
2						
.						
.						
n						
	2. Гирлянда с экранным кольцом					
1						
2						
.						
.						
n						
	3. Гирлянда с дефектным изолятором (№х)					
1						
2						
.						
.						
n						
	4. Гирлянда с дефектным изолятором (№у)					
1						
2						
.						
.						
n						

Таблица 2

Номер элемента от провода	Схема 1		Схема 2			Схема 3		Схема 4		Схема 5		Схема 6		Схема 7		
	ΔU_b В	ΔU_b %	без сопр.		с сопрот.		ΔU_b В	ΔU_b %								
			ΔU_b В	ΔU_b %	ΔU_b В	ΔU_b %										
1																
2																
3																
4																
5																
6																

$$\Delta U_i, \% = \frac{\Delta U_i}{U} \cdot 100,$$

где ΔU_i - падение напряжения на i -том элементе, В;

U - напряжение, поданное на схему замещения, В.

2. Записать падение напряжения на элементах гирлянды, измеренное с помощью измерительной штанги. Назвать номер дефектного изолятора.
3. Определить в кВ потенциал на шапке каждого изолятора гирлянды в измерениях по п. 1. Потенциал на шапке первого (от провода) изолятора определить по формуле $\varphi_1 = U_2 - a_1 \cdot U_2$, второго изолятора по формуле $\varphi_2 = \varphi_1 - a_2 \cdot U_2$, и т.д. (a_i – в относительных единицах). При отсутствии ошибок в измерениях на шапке последнего элемента должно получиться $\varphi_n \cong 0$. Напряжение U_2 следует брать наибольшее, поданное на гирлянду в измерениях по п. 1 или по указанию преподавателя.
4. По уравнению (2) проверить правильность результатов, полученных в п. 1.
5. Построить кривые распределения напряжения по цепочке емкостей для семи схем замещения модели по экспериментальным данным табл. 2. Сравнить экспериментальные данные с рассчитанными по формуле (7) для 2-3 схем.
6. На основе анализа полученных данных сделать выводы по работе.

4. Элементы исследований

Объяснить влияние конструктивного исполнения гирлянды (расщепление гирлянды, наличие нескольких параллельных цепей) на характер распределения напряжения по ее элементам.

5. Контрольные вопросы

1. Какие факторы влияют на неравномерное распределение напряжения по длине гирлянды?
2. Какие недостатки следуют из неравномерного распределения напряжения по длине гирлянды?
3. Перечислить методы регулирования напряжения вдоль гирлянды.
4. Почему увеличение собственной емкости изолятора выравнивает распределение напряжения по длине гирлянды?
5. Каким образом можно уменьшить падение напряжения на первом изоляторе гирлянды?
6. Какие методы применяются для контроля состояния изоляторов в гирлянде?
7. Назовите достоинства и недостатки шарового разрядника при исследовании распределения напряжения вдоль гирлянды.

6. Литература

1. Александров Г.Н., Иванов В.Л., Кизеветтер В.Е. Электрическая прочность наружной высоковольтной изоляции. – Л.: Энергия, 1969. – 239 с.
2. Кучинский Г.С., Кизеветтер В.Е., Пинталь Ю.С. Изоляция установок высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 368 с.
3. Куртенков Г.Е. Основы проектирования изоляции высоковольтного электрооборудования. – Томск: Изд-во НТЛ, 1999. – 276 с.
4. Куртенков Г.Е., Куртенков Д.Г. Расчет распределения напряжения по гирлянде подвесных изоляторов при наличии дефектных элементов. Сб. трудов 8ой ВНТК по «Энергетике». Томск, ТПУ, 2002, с.48-52.

Исследование распределения напряжения по гирлянде подвесных изоляторов при наличии дефектных элементов. Схема замещения гирлянды. Измерительные штанги.

Методические указания по выполнению
лабораторной работы

Составитель: Геннадий Ефимович Куртенков

Подписано к печати

Формат 60x84/16. Бумага писчая №2.

Печать RISO. Усл.печ.л. . Уч.-изд.л. .

Тираж экз. Заказ . Цена свободная.

Издательство ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.