

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ (МИИТ)

Кафедра «Электротехника, метрология и электроэнергетика»

Г.С. КАСАТКИН, В.В. ФЕДOTOV

**ИССЛЕДОВАНИЕ
ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ
В КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ**

*Методические указания
к лабораторной работе*

МОСКВА-2005

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ (МИИТ)

Кафедра «Электротехника, метрология
и электроэнергетика»

Г.С. КАСАТКИН, В.В. ФЕДOTOV

УТВЕРЖДЕНО
редакционно- издательским
советом университета

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ

Методические указания к лабораторной
работе для студентов специальности
«Электрический транспорт ж.д.»

Москва—2005

УДК 621.315.5
К-28

Касаткин Г.С., Федотов В.В. Исследование волновых процессов в кабельной линии: Методические указания к лабораторной работе. - М.: МИИТ, 2005. – 15с.

Приведены теоретические сведения об особенностях распространения электромагнитных волн в кабельных линиях и защитном действии кабельных вставок от перенапряжений

**© Московский государственный
университет путей сообщения
(МИИТ), 2005**

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение особенностей распространения электромагнитных волн в кабельных линиях и защитного действия кабельных вставок.

2. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

2.1. Распространение электромагнитных волн в линиях

При ударах молнии в линии, а также различных видах коммутации, например включение линии к источнику напряжения и т.п., в них возникают электромагнитные волны. Последние распространяются в виде волн напряжения и тока вдоль линий. Соотношение между напряжением волны U и током i определяется законом Ома для волны

$$i = \frac{U}{Z_B} \quad (1)$$

Волновое сопротивление линии без потерь ($r_0 = 0, g_0 = 0$)

$$Z_B = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} \quad (2)$$

В этом выражении L_0 и C_0 — индуктивность и ёмкость единицы длины линии. Следовательно, величина Z_B не зависит от длины линии.

Волновые сопротивления воздушных линий и двухпроводной контактной сети (контактный провод и несущий трос) однопутного участка железной дороги составляют 300 Ом. Для трёхпроводной контактной сети (контактный провод, несущий трос и усиливающий провод) это значение равно 225 Ом.

Так как расстояние между жилами кабеля значительно меньше расстояния между проводниками воздушной линии, то $C_{0 \text{ каб}} > C_{0 \text{ возд л.}}$, $L_{0 \text{ каб}} < L_{0 \text{ возд л.}}$. Поэтому волновое сопротивление кабеля существенно меньше волнового сопротивления воздушной линии.

В зависимости от типа изоляции и номинального напряжения волновое сопротивление применяемых в электроотяге кабелей составляет в среднем десятки Ом.

Скорость распространения электромагнитных волн вдоль линии без потерь определяется выражением

$$V = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0 \mu \epsilon}}, \quad (3)$$

где μ_0 - магнитная постоянная, равная $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м;

μ - относительная магнитная проницаемость среды, окружающей проводник линии;

ϵ_0 - диэлектрическая постоянная, равная $8,86 \cdot 10^{-12}$ Ф/м;

ϵ - относительная диэлектрическая проницаемость среды, окружающей проводник.

Так как для воздушных линий μ и ϵ равны 1, то скорость распространения в них волн

$$V_B = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad (4)$$

После подстановки в (4) величин μ_0 и ϵ_0 получим,

что $V_B = 300$ м/мкс = $3 \cdot 10^5$ км/с.

Скорость распространения волн в кабельных линиях V_K зависит от величины ϵ его изоляции, так как $\mu = 1$. В большинстве случаев для изоляции кабелей используются электротехническая бумага или полимеры, ϵ которых составляет в среднем $2,2 \div 4$. Поэтому скорость распространения волн в кабельных линиях, как следует из формул (3) и (4), с учетом $\mu = 1$, в $\sqrt{\epsilon}$ раз меньше V_B и для большинства кабельных линий лежит в пределах 150-200 м/мкс. При переходе волн с одной линии на другую или на сопротивление, расположенное в конце линии, происходит их преломление и отражение.

Напряжения преломленной $U_{пр}$ и отраженной $U_{отр}$ волн определяются выражениями:

$$U_{пр} = \alpha U_{пад}; \quad (5)$$

$$U_{отр} = \beta U_{пад}; \quad (6)$$

Коэффициенты преломления α и отражения β соответственно равны:

$$\alpha = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}; \quad (7)$$

$$\beta = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}. \quad (8)$$

В зависимости от соотношения величин волновых сопротивлений Z_1 и Z_2 коэффициенты α и β могут принимать следующие значения:

при $Z_2 = 0$ (линия замкнута в конце накоротко) $\alpha = 0, \beta = -1$;

при $Z_2 = \infty$ (линия разомкнута на конце) $\alpha = 2, \beta = 1$;

при $Z_2 = Z_1$ $\alpha = 1, \beta = 0$;

при $Z_2 > Z_1$ $\alpha > 1, \beta > 0$;

при $Z_2 < Z_1$ $\alpha < 1, \beta < 0$.

2.2. Исследование защитного действия кабельной вставки

Снижение амплитуды преломленных волн при переходе их с линии с бóльшим волновым сопротивлением Z_1 на линию с меньшим сопротивлением Z_2 используется в схемах защиты от перенапряжений подстанций и электрических машин. Так как волновое сопротивление кабелей значительно ниже сопротивления воздушных линий, то коэффициент преломления α при переходе волны из воздушной линии в кабель оказывается много меньше 1 и может составлять всего несколько сотых. Таким образом, амплитуда волны напряжения, прошедшей в кабель, оказывается во много раз меньше амплитуды набегающей из воздушной линии волны.

На практике для снижения величин перенапряжений используются кабельные вставки длиной 100 ÷ 200 м, включаемые в рассечку воздушных ЛЭП, или на подходах к подстанции. Характер перехода волны через вставку зависит не только от соотношения волновых сопротивлений вставки, но и от соотношения длины вставки l и длины воздействующей волны l_B . В реальных условиях при коротких кабельных вставках в них происходят, многократные постепенно затухающие отражения и преломления волн. Однократное преломление и отражение падающей волны с коэффициентами α и β имеет место в кабельной вставке только при выполнении соотношения:

$$l > \frac{l_B}{2} > \frac{t_B \cdot V_k}{2}, \quad (9)$$

где t_B - длительность падающей волны;

V_k - скорость распространения волны в кабеле.

Рассмотрим подробнее процесс многократного преломления и отражения волны в кабельной вставке. На рис.1 изображена кабельная вставка длиной l , включенная между линиями с волновыми сопротивлениями Z_1 и Z_3 . Здесь же нанесены коэффициенты преломления α и β с соответствующими подстрочными индексами. Первая цифра индекса коэффициентов α обозначает линию, с которой переходит волна; вторая - на которую она переходит.

Для коэффициентов отражения β первая цифра означает линию, на которую отражается волна, вторая - линию, от которой она отражается. На рис.1 изображена также характеристическая сетка многократных отражений и преломлений волн при прохождении вставки. Углы наклона линий графика определяются скоростью распространения волны в линии. При набегании волны бесконечной длины с амплитудой U_0 на линию Z_1 (включение линии Z_1 на постоянное напряжение) в момент времени t_0 она достигнет начала кабельной вставки (точка А). В результате перехода волны с Z_1 на Z_2 возникнут отраженная $U_0\beta_{12}$ и преломленная $U_0\alpha_{12}$ волны. Последняя через время $t = l/V_k$ достигнет конца вставки (точка Б) и снова преломится на Z_3 и отразится на Z_2 . Амплитуда преломленной волны будет равна $U_0\alpha_{12}\alpha_{23}$, а отраженной $U_0\alpha_{12}\beta_{23}$. Через время $t_2 = 2l/V_k$ волна $U_0\alpha_{12}\beta_{23}$ достигнет точки А и преломится на Z_1 . Амплитуда преломленной на Z_2 волны равна $U_0\alpha_{12}\beta_{23}\alpha_{21}$, а отраженной на $U_0\alpha_{12}\beta_{23}\beta_{21}$. Дальнейшие этапы, преломления и отражения волн показаны на рис.1 для моментов времени t_3, t_4 и t_5 . Для определения уровня напряжений в любой точке линии и в любой момент времени достаточно произвести наложение волн, набегавших на эту точку для рассматриваемого момента времени. Так, для точки Б амплитуды волн U в разные моменты имеют следующие значения: при $0 < t < t_1$ $U = 0$;

$$t_1 \leq t < t_3 \quad U = U_0\alpha_{12}\alpha_{23}; \quad t_3 \leq t < t_5 \quad U = U_0\alpha_{12}\beta_{23}\beta_{21}\alpha_{23};$$

$$t_5 \leq t < t_7 \quad U = U_0\alpha_{12}\beta_{23}\beta_{21}\alpha_{23}\beta_{23}\beta_{21} = U_0\alpha_{12}\alpha_{23}(\beta_{23}\beta_{21})^2.$$

Если число наложенных волн n , то амплитуда преломленной волны на линию Z_3 равна

$$U_{\text{пр3}} = U_0 \alpha_{12} \alpha_{23} [1 + \beta_{21} \beta_{23} + (\beta_{21} \beta_{23})^2 + \dots + (\beta_{21} \beta_{23})^{n-1}]. \quad (10)$$

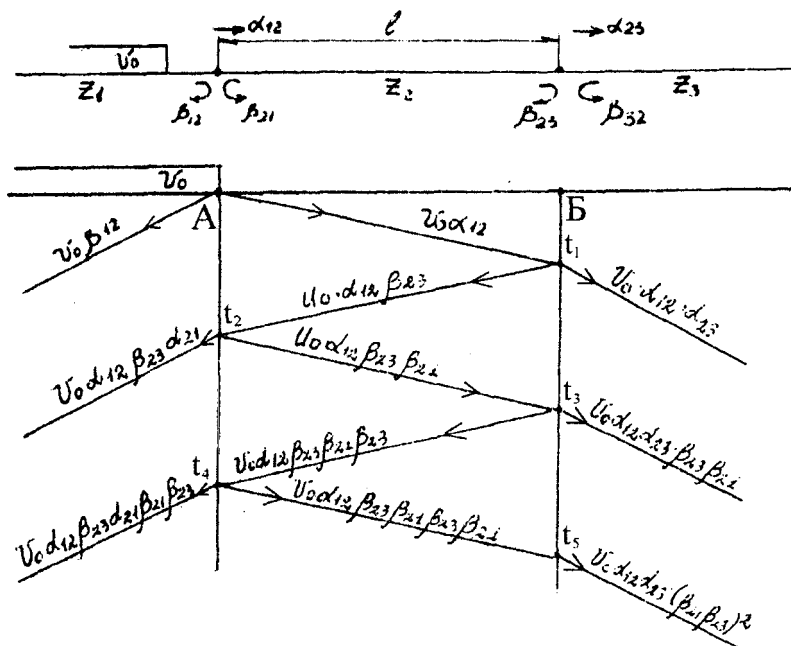


Рис. 1 Многократные преломления и отражения волн



Рис. 2 Форма преломленной волны

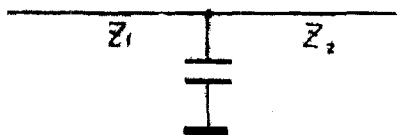


Рис. 3 Эквивалентная схема замещения кабельной вставки

При $n \rightarrow \infty$ и $t \rightarrow \infty$ выражение (10) приобретает вид:

$$U_{\text{пр3}} = U_0 \frac{\alpha_{12} \alpha_{23}}{1 - \beta_{21} \beta_{23}}. \quad (11)$$

После подстановки в (11) значений $\alpha_{12} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}$,

$$\alpha_{23} = \frac{2Z_3}{Z_2 + Z_3}, \quad \beta_{21} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}, \quad \beta_{23} = \frac{Z_3 - Z_2}{Z_3 + Z_2},$$

получим

$$U_{\text{пр3}} = \frac{2Z_3 U_0}{Z_1 + Z_3}. \quad (12)$$

В пределе вставка с волновым сопротивлением Z_2 перестает оказывать влияние на проходящую волну. Величина напряжения $U_{\text{пр3}}$ определяется соотношением волновых сопротивлений первой и третьей линии.

При построении формы преломленной волны $U_{\text{пр3}}$ определяются амплитуды преломленных волн в точке Б в моменты времени $0, t_1, t_3, t_5, t_7, \dots, t_n$ (см. рис.1). В результате построения для соотношения $Z_1 > Z_2 < Z_3$ получается ступенчатая фигура, изображенная на рис.2. Амплитуда U_1 первой ступени фронта преломленной волны $U_{\text{пр3}}$ равна $U_0 \alpha_{12} \alpha_{23}$. Подставляя величины коэффициентов преломления α_{12} и α_{23} , получим

$$U_1 = U_0 \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot \frac{2Z_3}{Z_2 + Z_3} = U_0 \frac{4}{1 + \frac{Z_1}{Z_2} + \frac{Z_1}{Z_3} + \frac{Z_2}{Z_3}}. \quad (13)$$

При включении кабельной вставки с волновым сопротивлением Z_K в рассечку воздушной линии $Z_B = Z_1 = Z_3$ формула (13) приобретает вид:

$$U_{\text{пр3}} = U_0 \frac{2Z_K}{Z_B + Z_K} \cdot \frac{2Z_B}{Z_B + Z_K}. \quad (14)$$

Как следует из выражений (13) и (14), чем меньше Z_2 по сравнению с Z_1 (Z_K по сравнению с Z_B), тем меньше первый скачок преломленной волны $U_{\text{пр3}}$. Для реальных условий $Z_K \approx 0,01 \div 0,1 Z_B$ ($Z_2 \approx (0,01 \div 0,1) Z_3, Z_1$) величина первого скачка невелика и значительно меньше амплитуды падающей волны U_0 . Это объясняется тем, что α_{12} при указанных соотношениях всегда меньше α_{23} . С ростом значения Z_3 , по сравнению с Z_2 , коэффициент преломления α_{23} незначительно растет и несколько увеличивается амплитуда первого скачка. Однако, даже при $Z_3 = \infty \alpha_{23}$ будет равно 2, поэтому для α_{12} порядка $0,1 \div 0,01$ амплитуда первого скачка $U_{\text{пр3}}$ будет меньше U_0 . Амплитуды последующих скачков напряжения снижаются, а величины их можно определить на основании формулы (10). Временной интервал каждой ступени скачка составляет $2l/V_K$. При снижении величины Z_2 по сравнению с Z_1 и Z_3 амплитуды скачков напряжения уменьшаются и при $Z_2 \ll Z_1$ и Z_3 форма фронта преломленной волны $U_{\text{пр3}}$ приближается к показанной пунктиром на рис.2. В этом случае кабельную вставку можно заменить эквивалентной емкостью, включенной между точкой перехода с линии 1 на линию 3 и землей (рис.3).

Для падающих волн U_0 конечной длины форма преломленной волны $U_{\text{пр3}}$ может быть построена путём графического наложения двух преломленных волн бесконечной длины равной амплитуды с противоположными знаками и сдвинутыми на величину длительности падающей волны t_B (рис.4). Фронты каждой из двух преломленных волн бесконечной длины представляют одинаковые ступенчатые фигуры, но с разными знаками. Полученное в результате графического наложения двух преломленных волн бесконечной длины изображение преломленной волны конечной длины показано на рис.4.

При уменьшении длины l_B (длительности t_B) падающей волны начнётся вычитание ступенчатых фронтов двух преломленных волн бесконечной длины. Получаемая в результате графического наложения этих волн преломленная волна $U_{\text{пр3}}$, построенная при длительности падающей волны t_{B1} , показана пунктиром на рис.4. Как видно на рисунке, амплитуда волны $U_{\text{пр3}}$ снижается, т.е. изменяется не только форма фронта преломленной волны, но и уменьшается напряжение этой волны.

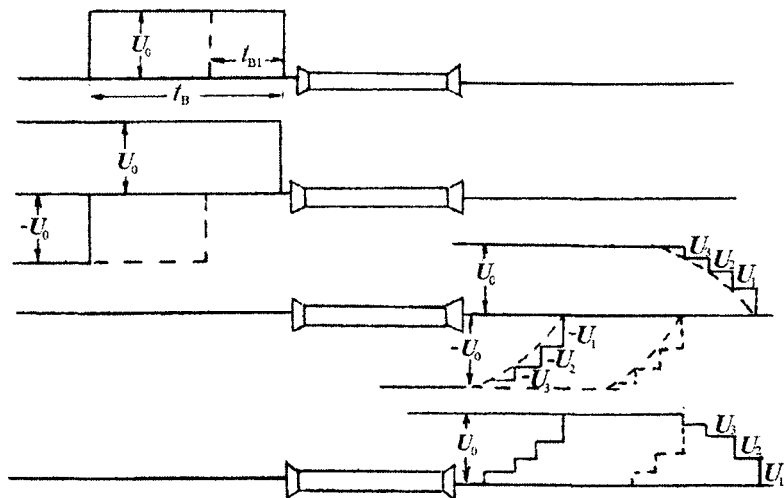


Рис.4 Прохождение волн конечной длины через кабельную вставку

При дальнейшем снижении длины волны l_B (длительности t_B) до $l_B = t_B \cdot V_K < 2l$ многократных отражений и преломлений, как указывалось выше (формула (9)), не будет и преломленная волна $U_{пр3} = U_0 \alpha_{12} \alpha_{23}$, т.е. амплитуда ее такая же, как при первом скачке (см. рис.4). Таким образом, защитное действие кабельной вставки, включенной между воздушной линией и подстанцией или в рассечку воздушной линии, питающей подстанцию, состоит в снижении величины скачка напряжения на элементах её оборудования, так как амплитуда первой ступени ступенчатого фронта преломленной волны существенно меньше амплитуды падающей волны (см. рис.4).

Такое снижение перепада напряжения позволяет уменьшить витковые перенапряжения на обмотках электрических машин подстанции (трансформатора и т.п.).

3. ПРОГРАММА РАБОТЫ

3.1. **Задание 1.** Определение волнового сопротивления кабеля Z_k , скорости распространения волны в нём V_k и относительной диэлектрической проницаемости ϵ его изоляции.

3.1.1. Подготовка к выполнению работы

Ознакомиться с инструкцией по эксплуатации электронного осциллографа (ЭО) и генератора прямоугольных импульсов (ГПИ).

3.1.2. Порядок выполнения работы

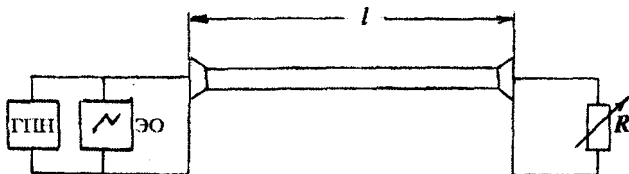


Рис.5 Схема измерения волновых параметров кабеля

Собрать схему рис. 5 и подготовить приборы к работе в соответствии с инструкциями: установить заданные преподавателем длительность импульса (волны) t_B и период следования волн.

Получить на экране электронного осциллографа изображение преломлённой и отраженной волн напряжения. Путем изменения сопротивления магазина R добиться отсутствия отраженной и преломлённой волн, (при $Z_k = R$). Зарисовать осциллограмму и измерить величину R по положению рукояток магазина сопротивления. По длительности t пробега волны до конца кабеля и обратно, измеренной с помощью калибратора длительности осциллографа, определить скорость волн в кабеле $V_k = 2l/t$. Определить величину относительной диэлектрической проницаемости изоляции кабеля $\epsilon = (300/V_k)^2$

Зарисовать осциллограммы, получаемые при $R > Z_k$ и $R < Z_k$. Полученные данные свести в табл.1

Волновые параметры кабеля

Параметры кабеля	Вид осциллограммы
$Z_K = \dots \text{ Ом}, V_K = \dots \text{ м/мкс}, \varepsilon = \dots$	
$Z_K = R$	
$Z_K > R \dots \text{ Ом}$	
$Z_K < R \dots \text{ Ом}$	

3.2. **Задание 2.** Определение параметров преломленной волны за кабельной вставкой

3.2.1. Подготовка к выполнению работы

Производится согласно пункту 3.1.1.

3.2.2. Порядок выполнения работы

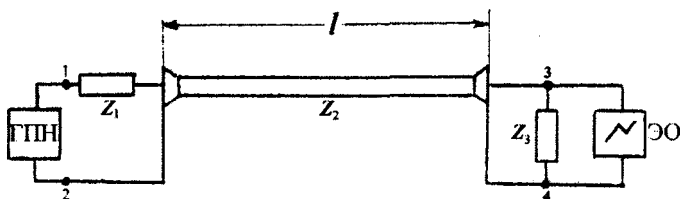


Рис.6 Схема установки для исследования защитных свойств кабельной вставки

Собрать схему рис.6 и подготовить приборы к работе в соответствии с инструкциями.

Установить заданные преподавателем длительность импульса (волны) t_B и период следования импульсов. Получить на экране электронного осциллографа, подключенного к выходу генератора

прямоугольных импульсов (точки 1 и 2 рис.6), устойчивое изображение импульса и измерить его амплитуду U_0 .

Подключить осциллограф к точкам 3 и 4 рис.6 и зарисовать осциллограмму при $Z_1 = Z_3$.

По полученной осциллограмме измерить амплитуды первой U_1 и последующих U_n ступеней напряжения преломлённой на Z_3 волны.

Определить отношения U_1/U_0 , U_2/U_1 , U_3/U_2 , и для этой волны.

Изменяя длительность t_B импульса (волны), зарисовать осциллограммы для 3 ÷ 4 величин t_B , указанных преподавателем. На основании полученных осциллограмм определить амплитуду $U_{пр3}$ преломленной на Z_3 волны.

Для одной из заданных величин t_B зарисовать осциллограммы для случаев $Z_1 > Z_3$ и $Z_3 > Z_1$.

Полученные данные свести в табл. 2.

Таблица 2

Параметры волн при применении кабельной вставки

Соотношение волновых сопротивлений	Параметры падающей волны	Параметры преломленной волны	Вид осциллограммы
$Z_1 = Z_3$	$U_0 = \dots В;$ $t_B = \dots с$	$\frac{U_1}{U_0} = ; \frac{U_2}{U_1} = ; \frac{U_3}{U_2} = ; U_{пр3} =$	
$Z_1 = Z_3$	$U_0 = \dots В;$ $t_B = \dots с$	$\frac{U_1}{U_0} = ; \frac{U_2}{U_1} = ; \frac{U_3}{U_2} = ; U_{пр3} =$	
$Z_1 = Z_3$	$U_0 = \dots В;$ $t_B = \dots с$	$\frac{U_1}{U_0} = ; \frac{U_2}{U_1} = ; \frac{U_3}{U_2} = ; U_{пр3} =$	

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Егоров В.В. Техника высоких напряжений: Учебное пособие для студентов вузов ж.д. транспорта. – М.: Маршрут, 2004. -188с.
2. Базуткин И.И. и др. Техника высоких напряжений. – М.: Энергоатомиздат, 1986. -464с.

СОДЕРЖАНИЕ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ	3
2. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ	3
2.1. Распространение электромагнитных волн в линиях	3
2.2. Исследование защитного действия кабельной вставки	5
3. ПРОГРАММА РАБОТЫ	11
3.1. Задание 1. Определение волнового сопротивления кабеля Z_K , скорости распространения волны в нём V_K и относительной диэлектрической проницаемости ϵ его изоляции	11
3.2. Задание 2. Определение параметров преломленной волны за кабельной вставкой	12

Учебно - методическое издание

Касаткин Георгий Сергеевич, Федотов Виктор Васильевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ
В КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ**

Методические указания к лабораторной работе

Подписано к печати: *28, 04, 05.*

усл.-печ.л. 1,0

Заказ: *324.*

Формат: 60x84/16

Тираж 100 экз.

Изд. № *130-05.*

127994, Москва, ул.Образцова , 15
Типография МИИТа