

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ СИГНАЛЬНО-БЛОКИРОВОЧНЫХ КАБЕЛЕЙ В АЛЮМИНИЕВОЙ ОБОЛОЧКЕ

DIELECTRIC STRENGTH OF SIGNAL AND BLOCKING CABLES WITH ALUMINIUM SHEATH

V.N. Rodionov, *Cand. Sc. (Engineering), Quality Director, JSC "Samara Cable Company";*

S.B. Morozov, *Leading Engineer of the Test Centre, JSC "Samara Cable Company";*

B.V. Popov, *Cand. Sc. (Engineering), Professor of the Department of Communication Lines and Measurements in Communication Technology, FGBOU VO "Povolzhsky State University of Telecommunications and Informatics";*

V.B. Popov, *Cand. Sc. (Engineering), Professor of the Department of Communication Lines and Measurements in Communication Technology, FGBOU VO "Povolzhsky State University of Telecommunications and Informatics"*

В.Н. Родионов, *канд. техн. наук, директор по качеству АО «Самарская Кабельная Компания»;*

С.Б. Морозов, *ведущий инженер испытательного центра АО «Самарская Кабельная Компания»;*

Б.В. Попов, *канд. техн. наук, профессор кафедры Линий связи и измерений в технике связи ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики»;*

В.Б. Попов, *канд. техн. наук, профессор кафедры Линий связи и измерений в технике связи ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики»*

Аннотация. В последние годы интенсивное развитие пассажирских скоростных и грузовых тяжеловесных перевозок предъявляет повышенные требования к безопасности и надёжности перевозочного процесса, разработке и внедрению перспективных технических средств и технологий в инфраструктуру путевого комплекса, железнодорожную автоматику и телемеханику. В этой связи предъявляются повышенные требования к характеристикам сигнально-блокировочных кабелей. В статье приводятся результаты исследования электрической прочности сигнально-блокировочных кабелей.

Ключевые слова: сигнально-блокировочный кабель, внешние электромагнитные поля, кратковременная электрическая прочность, пробивное напряжение, статистические методы

Abstract. In recent years, the intensive development of passenger high-speed and heavy-duty cargo traffic sets higher requirements for the safety and reliability of the transportation process, the development and introduction of advanced technical means and technologies for the infrastructure of the transport system, railway automation and telemechanics. In this regard, higher standards are set for the characteristics of signal and blocking cables. The article presents the results of the study of the dielectric strength of signal and blocking cables.

Key words: signal and blocking cable, external electromagnetic fields, short-term dielectric strength, breakdown voltage, statistical methods

*Материал поступил в редакцию 14.09.2023
Автор, ответственный за переписку: Попов В.Б.
E-mail: inkat@inbox.ru*



Общие положения

На сети железных дорог ОАО «РЖД» широко используется электротяга переменного тока. При этом создаются электромагнитные поля большой интенсивности и возникает значительное внешнее электромагнитное влияние на цепи железнодорожных кабелей. Для снижения величины внешнего электромагнитного влияния на таких линиях железных дорог применяются сигнально-блокировочные кабели с алюминиевой оболочкой и броней из стальных лент. Кабели для сигнализации и блокировки предназначены для сетей железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ), обеспечивающих передачу сигналов управления и информации, электропитания для работы устройств сигнализации, централизации и блокировки. Сигнально-блокировочные кабели обеспечивают надёжную работу линейных цепей автоблокировки и всего комплекса устройств электрической централизации стрелок и сигналов, горочной автоматической и диспетчерской централизации и переездной сигнализации [1]. В основном на железных дорогах применяются сигнально-блокировочные кабели с полиэтиленовой изоляцией и алюминиевой оболочкой. Алюминиевая оболочка обычно накладывается на специализированном технологическом оборудовании. Для этого используются алюминиевые прессы или высокочастотные сварочные станы. АО «Самарская Кабельная Компания» (АО «СКК») серийно выпускает сигнально-блокировочные кабели для железных дорог уже на протяжении более 30 лет. Отличительными чертами этих кабелей являются высокая надёжность и повышенные требования к разнообразным воздействиям механического и электромагнитного характера. Учитывая тот факт, что сеть железных дорог страны является важнейшим стратегическим объектом государственного значения, к железнодорожным кабелям предъявляются повышенные требования, особенно в части обеспечения стабильности их эксплуатационных параметров при различного рода негативных и дестабилизирующих воздействиях. Принимая во внимание важность объектов ОАО «РЖД», с учётом рекомендаций, разработанных Российским научно-исследовательским институтом управления на железнодорожном транспорте МПС РФ для применения на железных дорогах, была выбрана конструкция кабеля со сплошной алюминиевой оболочкой, в том числе усиленной броневыми защитными покровами [2, 3]. Конструкция кабеля со сплошной прессованной или сварной алюминиевой оболочкой кроме защиты от внешних электромагнитных воздействий обеспечивает надёжную защиту кабельного сердечника от проникновения влаги.

Следует также отметить, что важнейшей характеристикой защищённости от опасных внешних электромагнитных влияний является электрическая прочность изоляции сигнально-блокировочных кабелей. Это говорит об актуальности исследования электрической прочности этих кабелей. В России такие исследования проводились в основном на симметричных кабелях связи с кордельно-полистирольной изоляцией жил типа МКСА, а также на кабелях ШПД с плёночисто-плёночной изоляцией и многопарных LAN-кабелях [2–4]. В литературе об электрической прочности изоляции сигнально-блокировочных кабелей информация практически отсутствует. В настоящей статье приводятся результаты исследования электрической прочности изоляции сигнально-блокировочных кабелей производства АО «СКК».

Кратковременная электрическая прочность сигнально-блокировочных кабелей

Способность изоляции выдерживать воздействие приложенного электрического напряжения характеризуется её электрической прочностью. Электрическая прочность оценивается обычно напряжённостью электрического поля, приводящего к пробое изоляции. Пробой сопровождается коротким замыканием между токоведущими жилами или между жилами и экраном и выходом кабеля из строя. Процессы, происходящие в изоляции кабеля под действием электрического поля, достаточно сложные и в значительной степени зависят от типа изоляции. Согласно проведённым исследованиям [2–5], процессы, происходящие в изоляции под действием электрического поля, характеризуются начальными частичными разрядами (ЧР). Дальнейшее повышение напряжения приводит к возрастанию ЧР, и при достижении определённого испытательного напряжения происходит пробой изоляции. Кратковременное пробивное напряжение является важнейшей характеристикой, которая позволяет оценить качество наложения изоляции на медные жилы.

Если принять изолирующую среду двухпроводной линии однородной, то напряжённость электрического поля будет иметь максимальное значение на поверхности проводника по линии, соединяющей центры проводников (рис. 1а). При этом величина максимальной напряжённости определяется выражением [2]:

$$E_{\max} = \frac{U}{2 \cdot r_1 \cdot \ln(a/r_1)}, \text{ кВ/мм} \quad (1)$$

где a – расстояние между центрами проводников;
 r_1 – радиус проводников.

Формула (1) справедлива для случая, когда $\alpha \gg r_1$. В симметричной кабеле парной скрутки изолированные проводники расположены вплотную друг к другу (рис. 1б). В случае, если изолирующая среда двухпроводной линии однородная ($\varepsilon_1 = \varepsilon_2$), максимальная напряженность электрического поля в точках А и В может быть определена по формуле [2]:

$$E_{\max} = \frac{U_1 \sqrt{(x+1)/(x-1)}}{2 \cdot r_1 \cdot \ln(x + \sqrt{x^2 + 1})}, \text{ кВ/мм} \quad (2)$$

где $x = r_2 / r_1$.

В [8] указано, что при $\varepsilon_1 \neq \varepsilon_2$, то есть в случае испытания изолированных проводов, максимальное значение напряженности электрического поля за счёт скачка $\frac{\partial U}{d_n}$ на границе раздела сред перемещается в точку вблизи $x = 0$ с наружной стороны изоляции, то есть в воздух, и эта величина тем больше, чем больше отношение $\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}$. Таким образом, наиболее опасная область с точки зрения пробоя при испытаниях – это область вблизи начала координат.

В [8] приведён общий вид инженерных формул для определения максимальной напряженности электрического поля в изоляции провода в начале координат:

$$\frac{E_{\max}}{U} = \frac{E_0}{U} + \frac{\varepsilon - 1}{r_1} \left[Q_0 + Q_1 \left(\frac{r_2 - r}{r_1} \right) + Q_2 \left(\frac{r_2 - r}{r_1} \right)^2 + \dots \right] \quad (3)$$

где: Q_0, Q_1, Q_2 и т.д. – коэффициенты подбираются методом наименьших квадратов после исследования зависимости $\frac{r \cdot E_{\max}}{U} = f\left(\frac{r_2 - r}{r_1}\right)$, рассчитанной для заданного ряда маркоразмеров провода с помощью точных формул;

$$E_0 = \frac{2Q}{\sqrt{r_2^2 - r_1^2}} \quad (4)$$

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \quad (5)$$

Электрическая прочность изоляции кабелей характеризуется пробивным напряжением $U_{пр}$ и носит статистический характер, то есть при испытании кабелей на пробой наблюдается определённый разброс значений пробивных напряжений. Причиной разброса (рассеяния) отдельных значений пробивных напряжений чаще всего служит неоднородность самой изоляции (структурная неоднородность диэлектрика, неоднородность геометрических размеров). Имеют значение и другие факторы, такие как неоднородность электрического поля, влажность и др. Пробивное напряжение при переменном напряжении определяется главным образом начальной ионизацией воздушного объёма, после чего все напряжения прикладываются к полиэтиленовой изоляции, наложенной непосредственно на медные жилы.

Технологические особенности изготовления сигнально-блокировочных кабелей в АО «СКК»

В АО «СКК», которое присутствует на рынке более 70 лет, функционирует система менеджмента качества (СМК) как средство, обеспечивающее способность постоянно поставлять кабельную продукцию, отвечающую требованиям потребителей и соответствующую законодательным требованиям и требованиям нормативной документации. Руководство компании ставит своей целью повышение удовлетворённости потребителей посредством результативного применения СМК, включая процессы улучшения. В рамках инспекционных проверок СМК

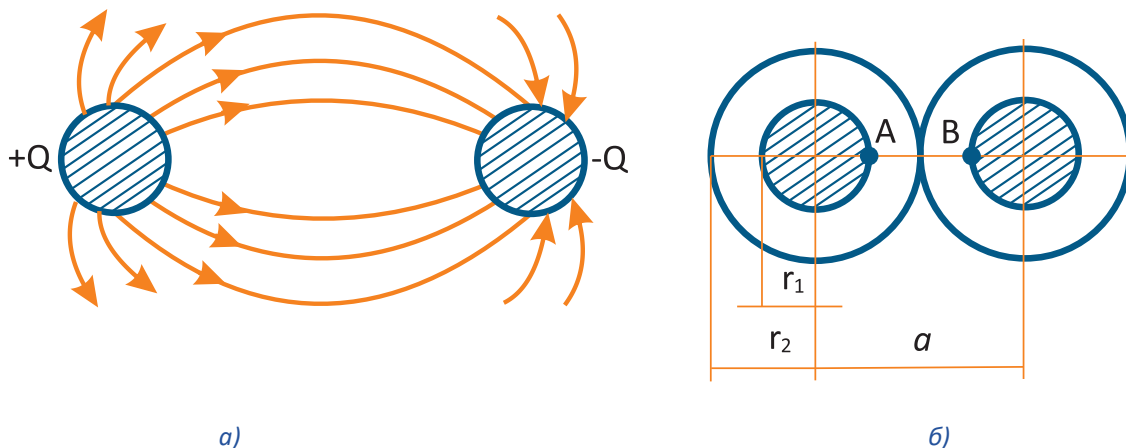


Рис. 1. Электрическое поле симметричной пары: а – двухпроводная линия в однородной изолирующей среде; б – двухпроводная линия с соприкасающимися изолированными проводниками



подтверждено действие сертификатов соответствия систем менеджмента требованиям российских и международных стандартов: ISO 9001; ISO 14001; ГОСТ РВ 0015–002. Работа по подтверждению соответствия СМК требованиям международных стандартов позволяет подтвердить статус одного из лучших поставщиков кабельной продукции вообще и сигнально-блокировочных кабелей в частности. Технологические особенности изготовления сигнально-блокировочных кабелей заключаются в том, что изготовление изолированной жилы также, как и для других симметричных кабелей связи, производится на экструзионной линии, оснащённой приборами контроля погонной ёмкости, диаметра, эксцентриситета изолированной жилы и проверки герметичности изоляции путём испытания на проход напряжением (используется оборудование фирм Zumbach и SIKORA). Измерители погонной ёмкости и диаметра включены в систему автоматического регулирования линии и обеспечивают заданные требования к изолированной жиле, в том числе по ёмкости, диаметру, толщине изоляции, концентричности [5]. Допуск на толщину изоляции составляет $\pm 1\%$ (0,003 мм), допуск на номинальную ёмкость менее 2 пФ, концентричность более 0,95. Скрутка кабельных пар осуществляется на крутильных машинах с разными (не более 100 мм) шагами, что обеспечивает уменьшение взаимных влияний между цепями кабеля. Всё это направлено на обеспечение высоких и стабильных электрических характеристик сигнально-блокировочных кабелей.

Определение кратковременной электрической прочности сигнально-блокировочных кабелей статистическим методом

Электрические свойства любых кабелей вследствие конструктивных и диэлектрических неоднородностей изменяются случайным образом от одной строительной длины к другой. Электрическая прочность кабеля определяется участком, имеющим наибольшую напряжённость поля E_{max} . Следовательно, для того чтобы ни в одном из сечений изоляция кабеля не была пробита, необходимо, чтобы прочность всех участков кабеля одновременно была больше наименьшего значения напряжения U_n .

Искомая вероятность $P(U > U_n)$ есть вероятность того, что для всех участков кабеля

$$P(U > U_n) = P(U_1 > U_n, U_2 > U_n, \dots, U_n > U_n). \quad (6)$$

В общем случае такая вероятность записывается с помощью n -мерного интеграла [3]:

$$P(U > U_n) = \int_{U_1=U_n}^{\infty} \int_{U_2=U_n}^{\infty} \dots \int_{U_n=U_n}^{\infty} f^{(n)}(U_1, U_2, \dots, U_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n \quad (7)$$

где $f^{(n)}(U_1, U_2, \dots, U_n)$ – многомерная функция распределения плотности вероятностей.

Каждому участку кабеля присуща своя электрическая прочность. Следовательно, для оценки строительных длин, состоящих, например, из 100–300 образцов единичной длины ($l = 1$ м) требуется вычисление 100–300-мерной функции распределения, что практически не может быть оправдано. Поэтому на практике пользуются более упрощёнными методами оценки параметров электрической прочности изоляции на строительных длинах. К параметрам сечений кабеля, которые характеризуют максимальную напряжённость поля, обычно относят геометрические параметры, расстояние между проводниками и диэлектрическую проницаемость изоляционных материалов. Параметры сечений, как случайные функции длины $U_{пр}(l)$, отвечают обычно условиям стационарности, а именно: математические ожидания и дисперсии их постоянны по длине, а корреляционный момент зависит только от разности координат двух сечений:

$$K_U(l_1, l_2) = m[U(l_1) \cdot U(l_2)] = K_U(l_1 - l_2) \quad (8)$$

Случайный процесс считается марковским в том случае, если его последующие значения не зависят от предшествующих. Для того чтобы оценить, насколько процессы, характеризующие электрическую прочность изоляции в различных сечениях кабеля, близки к марковским, в [3] приведены экспериментальные исследования по изменению пробивных напряжений по длине кабеля. С этой целью был взят образец кабеля МКСА-4×4×1,2 длиной 100 метров и разрезан на 12 образцов длиной по 8 м. Затем эти образцы разрезались на 9 образцов длиной по 0,8 м и на них были проведены испытания пробивных напряжений изоляции и рассчитаны коэффициенты корреляции между пробивными напряжениями, характеризующими отдельные сечения (отрезки) рассматриваемых длин кабеля. Значения коэффициентов корреляции показали, что процессы изменения пробивных напряжений по длине являются независимыми. Показано, что места пробоя распределены случайно и могут находиться с равной вероятностью на любом участке образца (длины) кабеля.

На основании отмеченного выше можно сделать вывод о том, что экспериментальные исследования пробивных напряжений сигнально-блокировочного кабеля целесообразно провести на коротких отрезках и с помощью статистических методов рас-

считать величины пробивных напряжений изоляции заданной длины.

Испытания пробивных напряжений сигнально-блокировочного кабеля марки СБВБАуБпШп 19×2×0,9 проводились напряжением переменного тока в заводских условиях на специально оборудованной для этих целей установке. Для электрического пробоя напряжением на образцах длиной 1,0 м использовалась установка УПУ-1М и аппарат сухого испытания АИИ-70. Установки на пробой оснащены автоматическим отключающим устройством, которое в случае перекрытия или пробоя испытуемого кабельного образца автоматически отключает источник напряжения от перекрытого или пробитого испытуемого кабельного образца за время не более 0,2 с. Испытания проводились при температуре окружающей среды от 20 до 26 °С и относительной влажности воздуха не более 50 %. С целью исключения перекрытия разряда по поверхности концов испытуемых образцов, изолированные жилы на концах разносились относительно друг друга на максимально возможные расстояния. Испытания образцов на электрический пробой в соответствии с требованиями ГОСТ 2990–78 для кабелей с парной скруткой проводились между жилами, а также между жилами и экраном (алюминиевой оболочкой).

Результаты измерения пробивных напряжений переменным током исследуемого кабеля обработаны методами математической статистики, приняв, что значения пробивного напряжения $U_{пр}$ распределены по нормальному закону. Отметим, что этот закон распределения $U_{пр}$ принят и в работах [2, 3]. Обработка сводилась к определению характеристик среднего значения пробивного напряжения $\bar{U}_{пр}$ и среднего квадратического отклонения σ . Статистическая обработка результатов испытания показала, что среднее значение пробивного напряжения исследуемых образцов кабеля составляет: между жилами – 32,9 кВ, между жилами и экраном – 32,1 кВ, при среднеквадратическом отклонении соответственно 1,67 кВ и 1,21 кВ.

Сравнение результатов исследования пробивного напряжения на коротких образцах сигнально-блокировочного кабеля со сплошной полиэтиленовой изоляцией с аналогичными исследованиями экранированного симметричного многопарного LAN-кабеля тоже со сплошной полиэтиленовой изоляцией [4] показал следующее. Пробивные напряжения между жилами пример-

но на 6 кВ, а между жилами и экраном на 11 кВ у исследуемого кабеля выше, чем у многопарного LAN-кабеля. Обусловлено это тем, что у сигнально-блокировочного кабеля полиэтиленовая изоляция на жилах на 0,12 мм толще, а также на кабельный сердечник этого кабеля наложена поясная изоляция. При этом разброс измеренных значений пробивных напряжений относительно среднего значения небольшой и практически такой же, как у многопарного LAN-кабеля. Это позволяет сделать вывод о том, что исследуемый сигнально-блокировочный кабель обладает высокой геометрической и диэлектрической однородностью.

При исследовании электрической прочности изоляции необходимо знать среднее значение пробивного напряжения на строительной длине кабеля. Проведение испытаний непосредственно на строительных длинах из-за их высокой стоимости возможно лишь в единичных случаях. Для упрощения эксперимента используются результаты испытаний образцов небольшой длины, и с помощью статистических методов рассчитывается электрическая прочность изоляции заданной строительной длины [2–5]. С увеличением длины кабеля величина пробивного напряжения снижается. Это можно объяснить тем, что с увеличением длины увеличивается и вероятность появления в кабеле более неоднородного участка изоляции. Согласно ГОСТ 34679–2020 «Кабели для сигнализации и блокировки. Общие технические условия» минимальная строительная длина исследуемого кабеля равна 300 м, поэтому представляет интерес задача: определить пробивное напряжение на эту строительную длину.

Кабель связи длиной L можно представить состоящим из N последовательно соединённых отрезков по l метров, то есть $l = L/N$, где l – длина образца кабеля, принятая для экспериментальных исследований. Большинство известных в настоящее время методов пересчёта предполагает статистическую независимость пробивных напряжений соседних участков изоляции кабеля, что и показано выше. Методика пересчёта пробивных напряжений изложена в [2, 3]. Исполь-

Таблица 1

N	$\bar{U}_{N \text{ жс-жс}}, \text{ кВ}$	$\bar{U}_{N \text{ жс-экр}}, \text{ кВ}$	$\bar{U}_{N_{\text{мин}} \text{ жс-жс}}, \text{ кВ}$	$\bar{U}_{N_{\text{мин}} \text{ жс-экр}}, \text{ кВ}$
300	32,9	32,1	31,3	30,6



зую эту методику и источники [6, 7] выполнены расчёты параметров пробивного напряжения на строительную длину, которые сведены в таблицу.

Анализ результатов пересчёта пробивных напряжений исследуемого кабеля на строительную длину показывает, что минимальные значения пробивного напряжения между жилами $\bar{U}_{N_{\text{мин}} \text{жс-жс}}$ значительно выше испытательного напряжения ($\bar{U}_{\text{ИСП жс-жс}}=2,5$ кВ переменного тока частотой 50 Гц). Пробивные напряжения между жилами и экраном $\bar{U}_{N_{\text{мин}} \text{жс-экр}}$ также значительно выше испытательного напряжения ($\bar{U}_{\text{ИСП жс-экр}}=3,0$ кВ переменного тока частотой 50 Гц).

ВЫВОДЫ

В результате проведённого исследования электрической прочности сигнально-блокировочного кабеля марки СБВБАУБпШп 19×2×0,9 в алюминиевой оболочке можно сделать следующие выводы:

1. Показано, что производство сигнально-блокировочных кабелей по технологии высокочастотных симметричных кабелей связи позволяет обеспечить высокие и стабильные их электрические характеристики.

2. Определены на коротких образцах кабеля средние значения пробивного напряжения: между жилами – 32,9 кВ, между жилами и экраном – 32,1 кВ, при среднеквадратическом отклонении соответственно 1,67 кВ и 1,21 кВ. Показано, что разброс измеренных значений пробивных напряжений относительно среднего значения небольшой и практически такой же, как у многопарного LAN-кабеля. Это позволяет заключить, что сигнально-блокировочные кабели обладают высокой геометрической и диэлектрической однородностью.

3. Определены величины пробивных напряжений на строительную длину и показано, что их минимальные значения между жилами и между жилами и экраном значительно выше испытательного напряжения.

Список источников

1. **Сторожук Н.Л.** Устройства защиты от перенапряжений и эффективность их применения // Электросвязь. 2006. № 2. С. 56–59.

2. **Брагин С.М.** Исследование электрической прочности воздушной стирофлексной изоляции кабеля статистическим методом // Электричество. 1959. № 9. С. 81–86.

3. **Лиманский Н.С.** Исследование электрической прочности изоляции междугородных симметричных кабелей связи: дис. ... канд. техн. наук. – М.: ВНИИКП, 1978. – 196 с.

4. **Баннов В.В., Попов Б.В., Попов В.Б.** Исследование электрической прочности многопарных LAN-кабелей // Инфокоммуникационные технологии. 2022. № 3. С. 29–35.

5. **Калинин Н.Д.** Электрическая прочность изоляции междугородных кабелей. – М.: Связь, 1979. – 88 с.

6. **Румшинский Л.З.** Математическая обработка результатов эксперимента. – М.: Наука, 1971. 192 с.

7. **Вентцель Е.С.** Теория вероятностей. – М.: Высшая школа, 2001. – 575 с.

8. **Пешков И.Б.** Теоретическая и экспериментальная разработка методов определения нагревостойкости и срока службы, создание нагревостойких и высокопрочных эмалированных проводов: дис. ... д-р техн. наук. – М.: МЭИ, 1977.

List of references

1. **Storozhuk N.L.** Surge protection devices and the efficiency of their application // Electrocommunication. 2006. No 2. P. 56–59.

2. **Bragin S.M.** Investigation of the electrical strength of the air styroflex cable insulation by a statistical method // Electricity // 1959. No 9. С. 81–86.

3. **Limansky N.S.** Investigation of the electrical insulation strength of long-distance symmetrical communication cables: Thesis for a candidate's degree. – М.: VNIICP, 1978. – 196 p.

4. **Bannov V.V., Popov B.V., Popov V.B.** Investigation of the electrical strength of multi-pair LAN cables // Infocommunication technologies. 2022. No 3. P. 29–35.

5. **Kalinin N.D.** The dielectric strength of inter-city cables. – М.: Svyaz', 1979. – 88 p.

6. **Rumshinsky L.Z.** The mathematical treatment of experimental results. – М.: Nauka, 1971. – 192 p.

7. **Wentzel E.S.** Probability theory. – М.: Higher school, 2001. – 575 p.

8. **Peshkov I.B.** Theoretical and experimental development of methods for the determination of heat resistance and service life, development of heat-resistant and high-strength enameled wires: doctoral dissertation. – М.: MEI, 1977.