



ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО КАБЕЛЯ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОВЕРХНОСТИ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Путем компьютерного моделирования исследуются распределения электрического поля в многослойной полиэтиленовой изоляции силового кабеля при наличии неровностей поверхности токопроводящей жилы и внутреннего полупроводящего слоя, а также в зависимости от электропроводности полупроводящего слоя. Показано, что выбор материала для изготовления такого слоя необходимо осуществлять с учетом его электрофизических свойств с тем, чтобы обеспечить экранирующие функции.

Введение. В современной мировой практике на ответственных промышленных и энергетических объектах для передачи мощности от энергоблоков к распределительным устройствам широко используются кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена. Трехслойная изоляционная структура таких кабелей состоит из основной полиэтиленовой изоляции, полупроводящего слоя по жиле — внутреннего слоя и полупроводящего экрана по изоляции — внешнего слоя (Рис. 1, а). Экранирующие слои играют важную роль в поддержании нормальной работы кабелей. Они предназначены для выравнивания скачка напряженности электрического поля между токопроводящей жилой и изоляцией, а также между изоляцией и металлическим экраном. Кроме того, полупроводящие слои накладываются для придания цилиндрической формы поверхности скрученной многопроволочной жилы, для уменьшения влияния эффекта проволочности — неровности поверхности жилы (Рис. 1, б) с целью снижения напряженности электрического поля у поверхности жилы.

Структура изоляции кабелей характеризуется наличием ряда объемных и поверхностных дефектов. К поверхностным дефектам относятся неровности полупроводящих слоев, например, из-за неровности поверхности прилегающей токопроводящей жилы. Объемными дефектами являются посторонние включения (проводящие и непроводящие), а также воздушные полости в полиэтиленовом материале. Такие включения, пустоты и другие дефекты вызывают локальные возмущения электрического поля, являются центрами зарождения и роста трингов, могут быть причиной пороговых электрофизических явлений, разрушающих изоляцию на микроуровне [1–3].

К ключевым факторам качества силовых кабелей относятся [1]:

- отсутствие дефектов на поверхности жилы;
- гладкая поверхность полупроводящих экранов;

- отсутствие включений и пустот в изоляции.

Различаются следующие основные виды поверхностных дефектов конструктивных элементов кабелей [1, 2, 4]: макронеровности поверхности жилы из-за эффекта проволочности (Рис. 1, б); микровыступы на поверхности жилы (Рис. 2, а); микровыступы на полупроводящем экране по жиле, направленные в объем основной изоляции (Рис. 2, б).

Детальное исследование характеристик дефектов в полиэтиленовой изоляции силовых кабелей (форма, геометрические размеры) проведено в работах [2, 5], однако количественный анализ степени неоднородности распределения электрического поля, создаваемого такими дефектами, изучен недостаточно подробно. В тоже время исследование распределения поля для наиболее характерных случаев и установление количественных зависимостей между его неоднородностью и повышенным значением в локальной области является важной практической задачей с точки зрения разработки рациональной технологии получения методом экструзии [6] многослойной изоляции кабелей с повышенным сроком службы.

В работе [4] проведено двух- и трехмерное компьютерное моделирование электрического поля в полиэтиленовой изоляции кабеля с поверхностными и объемными дефектами, дана оценка степени неоднородности поля в их окрестности.

В данной работе рассматриваются и анализируются эффекты, связанные с возмущением электрического поля из-за неровностей поверхности жилы высоковольтного кабеля и ее полупроводящего покрытия. Применяются элементы метода многомасштабного моделирования.

Описание задачи и модель для расчетов. Для исследования выбран силовой кабель с полиэтиленовой изоляцией марки АпвЭгаП 1 × 500/95 на напряжение 110 кВ, сечение которого показано на Рис. 1, а, а фрагменты жилы и полупроводяще-

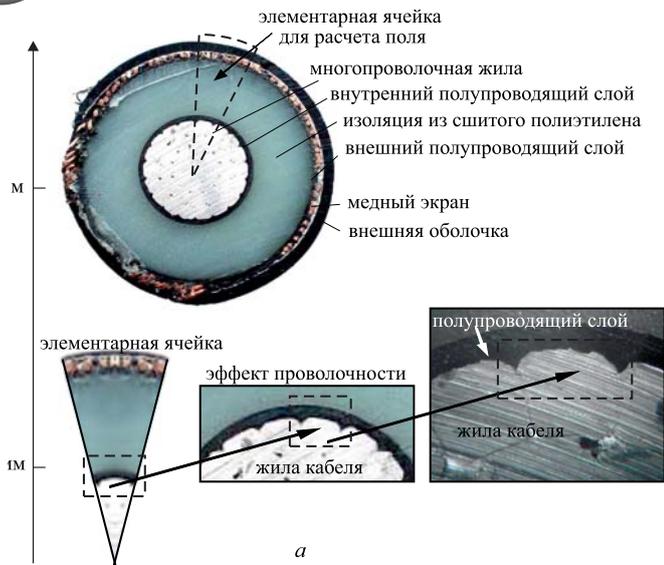


Рис. 1. Схема моделирования электрического поля в изоляции кабелей (а); неровности поверхности жилы кабеля – эффект проволочности (б).

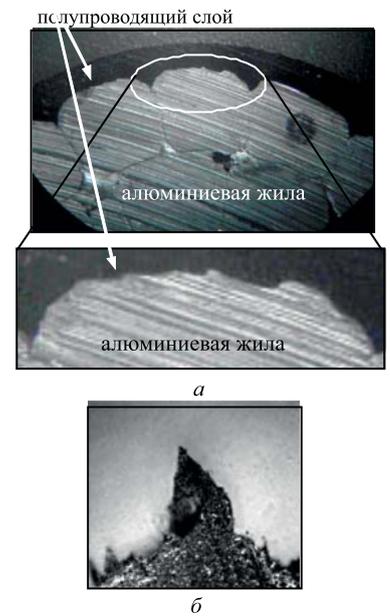


Рис. 2. Неровность поверхности жилы (а) и острый выступ полупроводящего экрана в изоляцию высотой 80 мкм [1] (б).

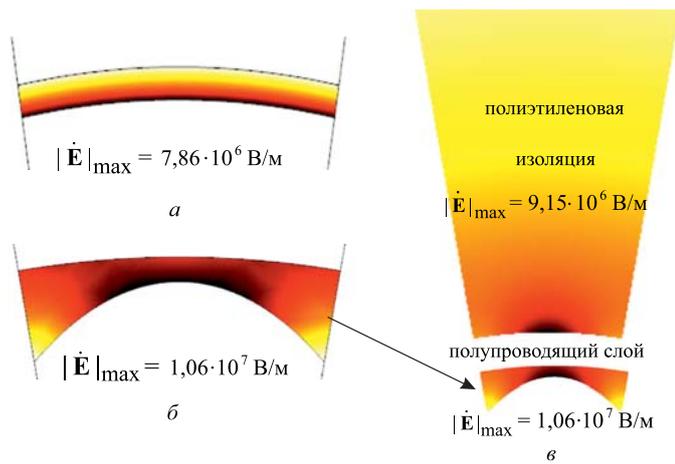


Рис. 3. Распределение электрического поля в полупроводящем слое и в изоляции (в) в случае: ровной поверхности жилы (а); учета эффекта проволочности (б, в).

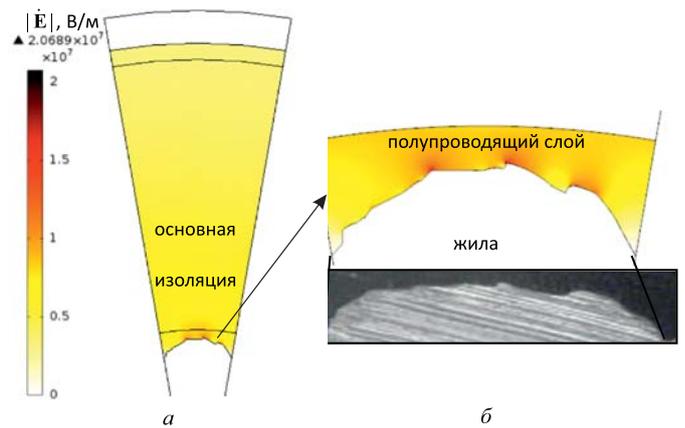


Рис. 4. Распределение электрического поля в объеме: элементарной ячейки сечения кабеля (а) и полупроводящего слоя при неровности поверхности жилы (б).

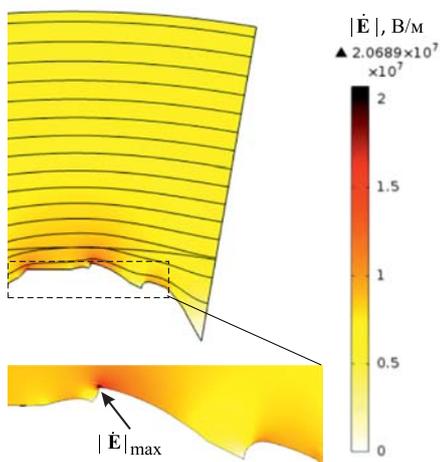


Рис. 5. Распределение поля (в цвете) и электрического потенциала ϕ (контурными линиями) в выделенном объеме элементарной ячейки (вверху) и в подобласти полупроводящего слоя с наиболее характерными неровностями (внизу).

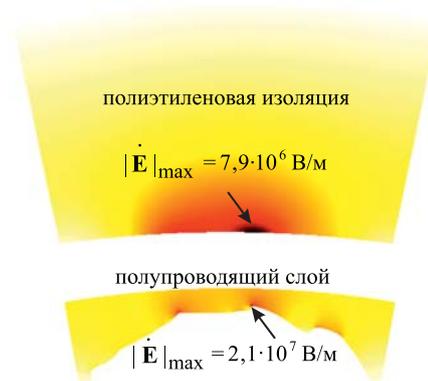


Рис. 6. Распределение электрического поля отдельно в фрагменте основной изоляции (вверху) и в полупроводящем слое с поверхностными неровностями (внизу).



го экрана — на Рис. 2, *a* и *б* соответственно. Видно, что поверхность жилы характеризуется макроразмерными неровностями как результат технологии изготовления таких многопроволочных жил. Кроме того, на поверхности жилы имеются неровности в виде зазубрин, микровыступов и впадин (Рис. 2, *a*). Для устранения негативного влияния таких дефектов на распределение электрического поля используется полупроводящий слой (экран) с высокой по отношению к полиэтилену электропроводностью.

С точки зрения локального увеличения поля другим важным видом поверхностных дефектов в силовых кабелях являются микровыступы на поверхности полупроводящего слоя, направленные в сторону изоляции (Рис. 2, *б*).

Все виды указанных поверхностных макро- и микронеровностей вызывают неравномерность распределения электрического поля в приповерхностных областях полиэтиленовой изоляции и могут приводить к возникновению и распространению трингговых структур.

Для количественного анализа степени неоднородности электрического поля в связи с наличием описанных выше дефектов далее рассматривается расчет электрического поля в неоднородной области в общем случае сложной формы. Схема расчета представлена на Рис. 1.

Исследование электрического поля

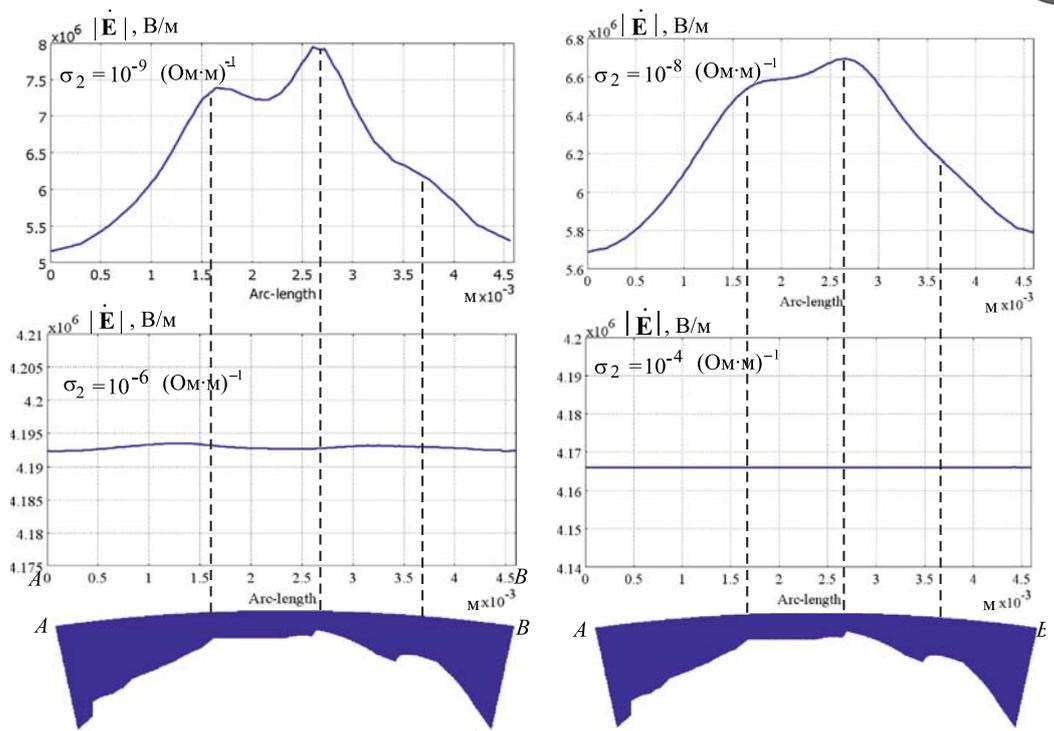


Рис. 7. Изменение электрического поля вдоль внешней поверхности полупроводящего слоя (вдоль дуги *AB*) при различных значениях электропроводности полупроводящего слоя σ_2 ; пунктирными линиями отмечены соответствия микровыступам на жиле.

проводится с помощью выделения из ряда одинаковых секторов в сечении кабеля одного сектора, который представляет собой элементарную ячейку структуры [7], показанную на Рис. 1, *a*. В таком случае картина поля во всем сечении кабеля воспроизводится путем периодического повторения по угловой координате распределения поля в эле-

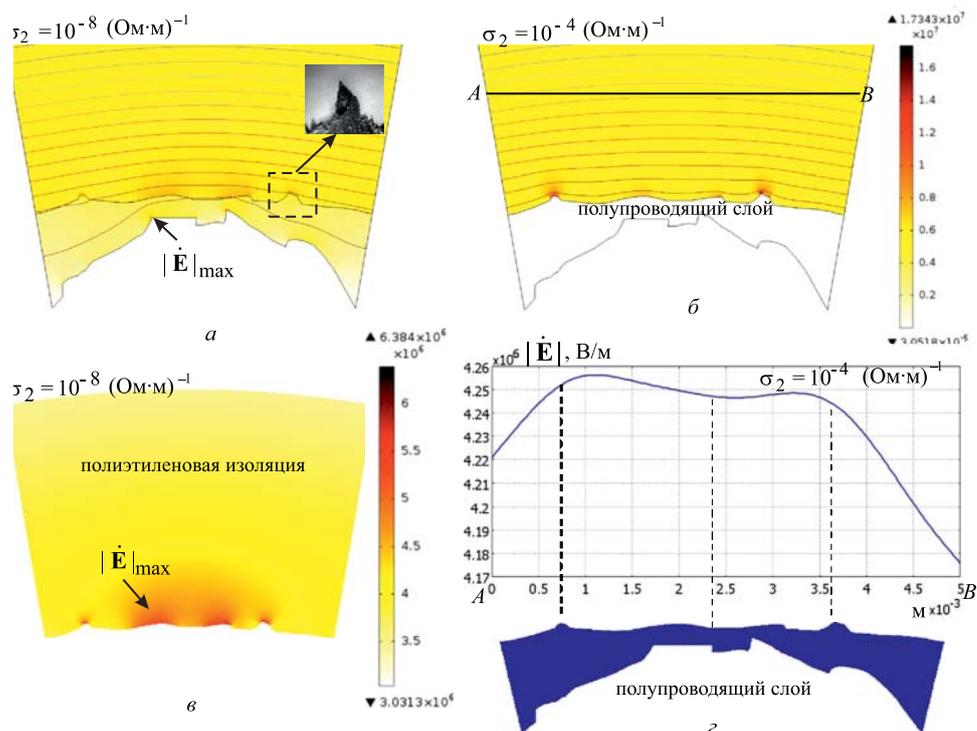


Рис. 8. Распределение электрического поля в выделенной области изоляции (*a*), (*б*), и отдельно в основной изоляции (*в*); изменение поля вдоль отмеченной линии *AB* (*г*) при различных значениях электропроводности полупроводящего слоя σ_2 .



ментарной ячейке.

Основным уравнением модели является дифференциальное уравнение для комплексной величины электрического потенциала $\dot{\Phi}$:

$$\nabla(\sigma + j\omega\varepsilon_0\varepsilon_r)\nabla\dot{\Phi} = 0, \quad (1)$$

где ε_0 и ε_r — соответственно абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума и относительная диэлектрическая проницаемость среды (комплексная величина в общем случае); σ — электропроводность соответствующей среды; $\omega = 314 \text{ Гц}^{-1}$ — угловая частота; точкой наверху обозначаются комплексные величины.

В модели пренебрегается влияние объемного электрического заряда, инжектируемого с поверхности жилы и медного экрана в изоляцию. Задаются различные значения электрических параметров ε_r и σ в основной изоляции и полупроводящих слоях.

В качестве граничных условий выбираются: на поверхности жилы — $\dot{\Phi} = U_m$; на поверхности медного экрана — потенциал $\dot{\Phi} = 0$; на боковых границах элементарной ячейки — условие Неймана $\partial\dot{\Phi}/\partial n$ (\mathbf{n} — единичный вектор внешней нормали).

После определения потенциала $\dot{\Phi}$ напряженность электрического поля рассчитывается как $\dot{\mathbf{E}} = -\nabla\dot{\Phi}$.

Результаты компьютерного моделирования. Заданные для расчетов значения величин следующие: электропроводность основной изоляции $\sigma_1 = 10^{-10} \text{ (Ом}\cdot\text{м)}^{-1}$; электропроводность полупроводящего слоя $\sigma_2 = 10^{-9} \text{ (Ом}\cdot\text{м)}^{-1}$; диэлектрическая проницаемость материалов $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 2,3$; толщина полупроводящего слоя — 1 мм; частота — 50 Гц; амплитудное значение фазного напряжения $U_m = \sqrt{2} \cdot 110 / \sqrt{3} \text{ кВ}$.

Эффект проволочности токопроводящей жилы. Как показывают результаты расчетов, неровность поверхности жилы, связанная со скруглениями проводов в ее составе (Рис. 1), увеличивает электрическое поле в полупроводящем слое (Рис. 3). Это, в свою очередь, оказывает влияние на распределение напряженности электрического поля $|\dot{\mathbf{E}}| = \sqrt{\dot{E}_x E_x^* + \dot{E}_y E_y^*}$ в основной изоляции (Рис. 3, в).

Неровности поверхности токопроводящей жилы на микроуровне. В предположении, что поверхность жилы имеет микровыступы и впадины,

результаты расчета поля $|\dot{\mathbf{E}}|$ в элементарной ячейке сечения кабеля и отдельно в полупроводящем слое приведены на Рис. 4. Видно, что максимальное значение поля в объеме полупроводящего слоя более, чем на порядок отличается от максимального поля в основной изоляции.

Для более детального исследования распределения электрического поля с неровностью поверхности жилы и полупроводящего слоя используются положения многомасштабного моделирования, и выделяется подобласть элементарной ячейки, показанная пунктиром на Рис. 1, а внизу. Для нее решается задача определения электрического потенциала (1) с такими граничными условиями: на нижней границе, совпадающей с поверхностью жилы, — потенциал $\dot{\Phi} = U_m$, на боковых границах — условие электрической изоляции, на верхней границе — комплексное значение потенциала, найденное из решения задачи на элементарной ячейке (Рис. 4, а).

Результаты численного решения электрической задачи в выделенной области показаны на Рис. 5, откуда видно, что значительные возмущения поля происходят на остриях и в окрестности микровыступов — значения $|\dot{\mathbf{E}}|$ здесь увеличиваются более чем в два раза. Показано также слабое влияние экрана на распределение поля в основной изоляции при заданной электропроводности материалов.

На Рис. 6 даны распределения поля $|\dot{\mathbf{E}}|$ в объеме изоляции и внутреннего экрана, показывающие возмущение поля от микронеровностей поверхности жилы на достаточном расстоянии от их расположения.

Рассмотрение электрического поля в выделенной области (на Рис. 5 вверху) необходимо в случае, когда значения электропроводности материалов σ_1 и σ_2 отличаются на несколько порядков (Рис. 7) и при расчете поля в изоляции с неровностями поверхности внутреннего экрана, например, как на Рис. 8. К тому же, модель для такого фрагмента элементарной ячейки позволяет выбирать более мелкую конечно-элементную сетку во всей расчетной области и в окрестности неровностей, достигая тем самым более высокой точности расчетов.

Данные Рис. 6—8 показывают следующее:

- распределение электрического поля в объеме полиэтиленовой изоляции зависит от значения электропроводности полупроводящего слоя;
- внутренний экран более в полной мере выполняет свою функцию сглаживания электричес-



кого поля в основной изоляции при более высоких значениях электропроводности своего материала, что важно при выборе такого материала;

- существует пороговое значение электропроводности экрана по жиле, выше которого на его внешней поверхности и, соответственно, на границе с изоляцией поле распределено равномерно; для рассматриваемого случая пороговое значение

$$\sigma_1^* = 10^{-6} \text{ (Ом}\cdot\text{м)}^{-1};$$

- возмущение электрического поля от совокупности неровностей поверхности жилы и выступов полупроводящего экрана проявляется в изоляции на достаточном расстоянии от них;

- максимальные значения напряженности электрического поля зависят от месторасположения неровностей и их формы (радиуса скругления).

Отметим, что поскольку неоднородность электрического поля в объеме изоляции содействует ее ускоренному старению, обеспечение гладкости поверхности токопроводящей жилы и внутреннего полупроводящего экрана является одной из важных задач в реализации современной технологии изготовления силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена.

Заключение. В работе исследован характер распределения электрического поля в многослойной полиэтиленовой изоляции высоковольтного кабеля с учетом наличия неровностей поверхности жилы и дефектов (микровыступов в изоляцию) полупроводящего экрана по жиле, а также в зависимости от электропроводности материала экрана. Показана важность достижения на практике высокой степени гладкости поверхности жилы и внутреннего экрана для предотвращения локальных неоднородностей электрического поля в полиэтиленовой изоляции и, как следствие, ее возможного ускоренного старения.

Существует пороговое значение электропроводности полупроводящего экрана (в рассматриваемом случае равно $\sim 10^{-6} \text{ (Ом}\cdot\text{м)}^{-1}$), выше которого происходит сглаживание электрического поля в изоляции и экран в полной мере выполняет свои функции. Это должно учитываться при выборе материала изготовления полупроводящего слоя по жиле.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Образцов Ю.В., Фрик А.А., Сливов А.А.* Силовые кабели среднего напряжения с изоляцией из сшитого полиэтилена. Факторы качества // Кабели и провода. – 2005. – № 1. – С. 9–14.

2. *Шувалов М.Ю., Ромашкин А.В., Овсиенко В.Л.* Анализ дефектов в изоляции силовых высоковольтных кабелей методами видеомикроскопии и микроэксперимента // Электричество. – 2000. – № 5. – С. 49–57.

3. *Dissado L.A., Wolfe S.V., Fothergill J.C.* A study of the factors influencing water tree growth // IEEE Trans. on Electrical Insulation. – 1983. – Vol. 18. – P. 565–576.

4. *Шидловский А.К., Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н., Золотарев В.М., Карпушенко В.П., Антонец Ю.А., Василец Л.Г.* Неоднородность распределения электрического поля в полиэтиленовой изоляции силовых кабелей с учетом поверхностных и объемных дефектов // Техн. електродинаміка. Темат. вип. "Силова електроніка та енергоефективність". – 2006. – Ч. 1. – С. 96–105.

5. *Steennis E.F., Kreuger F.H.* Water treeing in polyethylene cables // IEEE Trans. on Electrical Insulation. – 1990. – Vol. 25, Is. 5. – P. 989–1028.

6. *Золотарев В.М., Антонец Ю.А., Обозный А.Л.* Руководство по выбору, прокладке, монтажу, испытаниям и эксплуатации кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение от 45 до 150 кВ. – Харьков: ПАО "Завод "Южкабель". – 2014. – 88 с.

7. *Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н.* Многомасштабное моделирование в электротехнике. – К.: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2011. – 255 с.

© Кучерявая И.Н., 2015

