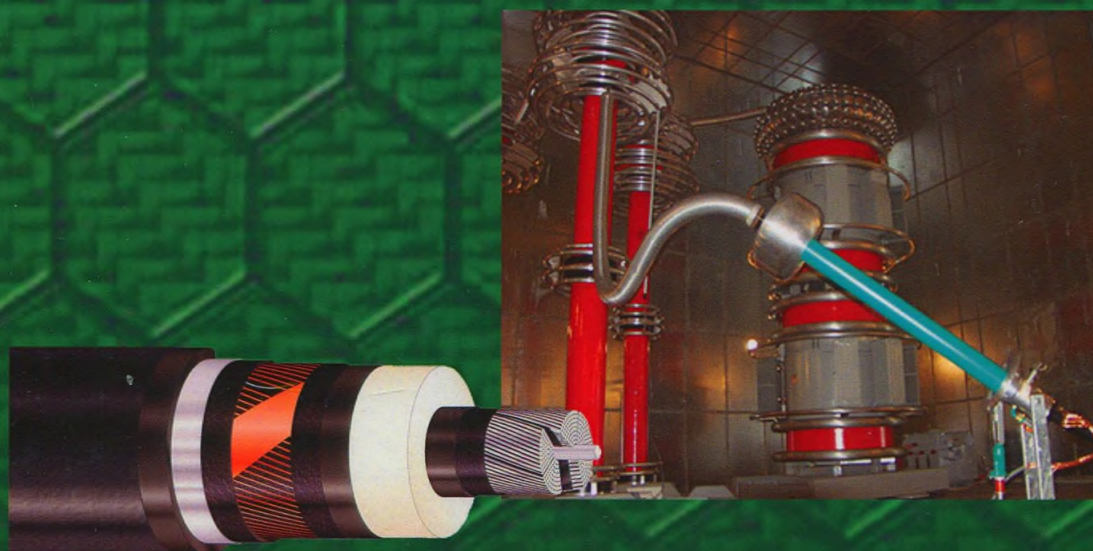


621.315.2
Э45

В.В. Золотарёв, М.А. Щерба, А.Г. Гурин,
Н.И. Супруновская, Е.Ю. Чопов, А.Л. Обозный

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС

ПРОИЗВОДСТВА КАБЕЛЬНЫХ СИСТЕМ
НА НАПРЯЖЕНИЕ ДО 400 кВ



**Национальная академия наук Украины
Институт электродинамики
ПАО "Завод Южкабель"**

**В. В. Золотарев, М. А. Щерба, А. Г. Гурин,
Н. И. Супруновская, Е. Ю. Чопов, А. Л. Обозный**

**ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС
ПРОИЗВОДСТВА КАБЕЛЬНЫХ СИСТЕМ
НА НАПРЯЖЕНИЕ ДО 400 кВ**

**Киев
"Про формат"
2017**

**National Academy of Sciences of Ukraine
Institute of Electrodynamics
PJSC "Yuzhkabel Works"**

**V. V. Zolotarev, M. A. Shcherba, A. G. Gurin,
N. I. Suprunovska, E. Yu. Chopov, A. L. Oboznyi**

**ELECTROTECHNOLOGICAL COMPLEX
FOR PRODUCTION OF CABLE SYSTEMS
FOR VOLTAGE UP TO 400 kV**

**Kiev
"Pro format" 2017**

УДК 621.3.01: 621.3.048

ББК 31.21

Утверждено к печати ученым советом
Института электродинамики НАН Украины
(Протокол № 16 от 21 декабря 2017 года)

Рецензенты: *В. Ф. Евдокимов*, чл.-корр. НАН Украины, д.т.н., проф.,
В. Ф. Резцов, чл.-корр. НАН Украины, д.т.н., проф.,
В. А. Бржезицкий, д.т.н., проф.

Электротехнологический комплекс производства кабельных систем на напряжение до 400 кВ. - Киев: Про Формат, 2017.-594 с.

Описан электротехнологический комплекс производства кабельных систем на напряжение до 400 кВ, состоящий из шести систем: 1) контроля качества материалов и изделий, 2) разработки новых технологий, материалов и изделий, 3) изготовления высококачественных токопроводящих жил, в т.ч. сегментированных типа Милликен, 4) экструзионного наложения на жилу трехслойной полимерной изоляции с ее вулканизацией в инертной среде при высоких температуре и давлении, 5) наложения экранирующих и защитных металлических и композитных оболочек, а также 6) испытаний (приемо-сдаточных, периодических, типовых и предквалификационных) кабельных систем. Создание этого электротехнологического комплекса позволяет обеспечить потребности Украины в создании новых кабельных линий электропередачи, в т.ч. и на напряжение 400 кВ, применяемое при интеграции энергосистем в странах ЕС.

Для специалистов исследующих электрофизические процессы при изготовлении и эксплуатации современных сверхвысоковольтных кабелей, а также для аспирантов и студентов электротехнических специальностей, изучающих изменение технического состояния полимерной изоляции при ее эксплуатации в сильных электрических полях.

Описано електротехнологічний комплекс виробництва кабельних систем на напругу до 400 кВ, що складається з шістьох систем: 1) контролю якості матеріалів і виробів, 2) розробки нових технологій, матеріалів і виробів, 3) виготовлення високоякісних струмопровідних жил, у т.ч. сегментованих типу Міллікен, 4) екструзійного накладення на жилу тришарової полімерної ізоляції з її вулканізацією в інертному середовищі при високих температурі й тиску, 5) накладення екрануючих та захисних металевих і композитних оболонок, а також 6) випробувань (приймально-здавальних, періодичних, типових і передкваліфікаційних) кабельних систем. Створення цього електротехнологічного комплексу дозволяє забезпечити потреби України у створенні нових кабельних ліній електропередачі, у т.ч. і на напругу 400 кВ, яка застосовується при інтеграції енергосистем у країнах ЄС.

Для фахівців, що досліджують електрофізичні процеси при виготовленні й експлуатації сучасних надвисоковольтних кабелів, а також для аспірантів і студентів електротехнічних спеціальностей, що вивчають змінення технічного стану полімерної ізоляції при її експлуатації в сильних електричних полях.

ISBN 978-966-02-8461-6

© В. В. Золотарев, М. А. Щерба, А. Г. Гурин,
Н. И. Супруновская, Е. Ю. Чопов, А. Л. Обозный, 2017

UDC 621.3 .01:621.3.048
BBK31.2

Reviewers: *V. F. Evdokimov*, Corresponding Member National Academy of Sciences of Ukraine, Doctor of Technical Sciences, Professor;
V. F. Reztsov, Corresponding Member National Academy of Sciences of Ukraine, Doctor of Technical Sciences, Professor;
V. A. Brzhezitsky, Doctor of Technical Sciences, Professor.

**Authors: V. V. Zolotarev, M. A. Shcherba, A. G. Gurin, N. I. Suprunovska,
E. Yu. Chopov, A. L. Oboznyi**

Electro-technological complex for production of cable systems for voltage up to 400 kV

It is described the electro-technological complex for production of cable systems for voltage up to 400 kV, consisting of six systems: 1) quality control of materials and products, 2) development of new technologies, materials and products, 3) manufacturing of high-quality electrically conductive cores, including segmented Milliken type, 4) extrusion layup of three-layer polymeric insulation on the core with further vulcanization of the insulation in an inert medium at high temperature and pressure, 5) layup of shielding and protective metal and composite shells, and 6) tests (acceptance, periodic, typical and prequalification) cable systems. The creation of this electro-technological complex allows to ensure the needs of Ukraine in the creation of new cable transmission lines, including for voltage of 400 kV that is used in the power systems integration in the EU countries.

The book is intended for experts, who study the electro-physical processes in the manufacture and operation of modern ultrahigh-voltage cables, as well as for graduate students and students of electrical engineering professions studying the change in the technical state of polymer insulation during its operation in strong electric fields.

ISBN 978-966-02-8461-6

© V. V. Zolotarev, M. A. Shcherba, A. G. Gurin,
N. I. Suprunovska, E. Yu. Chopov, A. L. Oboznyi, 2017

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	10
ГЛАВА 1	
СОЗДАНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ПРОИЗВОДСТВА КАБЕЛЬНЫХ СИСТЕМ НА НАПРЯЖЕНИЕ ДО 400 кВ	21
1.1. Научный и технологический аспекты создания электротехнологических комплексов производства сверхвысоковольтных кабельных систем.....	22
1.2. Структура электротехнологического комплекса производства конкурентоспособных кабелей на напряжение до 400 кВ.....	25
1.3. Особенности изготовления токопроводящих жил для кабелей на сверхвысокие напряжения.....	44
1.4. Применение сшитой полиэтиленовой изоляции в сверхвысоковольтных кабелях.....	50
1.5. Полупроводящие полимерные слои, экранирующие изоля- цию в кабелях на сверхвысокое напряжение.....	65
1.6. Международная сертификация кабельных систем.....	73
ГЛАВА 2	
ВЗАИМОСВЯЗАННЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ И ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ИНДУКЦИОННЫХ КАНАЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕДНОЙ КАТАНКИ ДЛЯ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ	78
2.1. Технологические особенности системы изготовления высококачественной медной катанки.....	82
2.2. Расчет эквивалентных электрических параметров индуктора канальной печи для изготовления медной катанки.....	90

Содержание

2.3. Физико-математическая постановка задачи расчета взаимосвязанных электромагнитных и тепловых процессов в индукционных канальных печах.....	102
2.4. Трехмерное моделирование электромагнитного и теплового полей в индукторе канальной печи для нагрева меди с учетом нелинейных свойств материалов и сложной трехмерной геометрии элементов печи.....	112
2.5. Изменение электромагнитных и тепловых полей в индукционных канальных печах в зависимости от конфигурации дефектов футеровки.....	119
2.6. Индукционная установка градиентной термообработки движущихся алюминиевых слитков.....	129
2.7. Кондукционно-индукционная установка горячего прессования алюминиевой катанки с высоким качеством поверхности.....	138
2.8. Основные методы повышения качества алюминиевых жил большого сечения.....	149
 ГЛАВА 3	
ИЗГОТОВЛЕНИЕ СШИТОЙ ПОЛИЭТИЛЕНОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ И ЕЕ ЭКРАНИРОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДЯЩИМИ СЛОЯМИ.....	157
3.1. Особенности нанесения на жилу многослойной полиэтиленовой изоляции и ее наноструктурного упрочнения.....	158
3.2. Электротехнологическая система для экструзионного нанесения на жилу трехслойной полиэтиленовой изоляции и ее вулканизации в камере наклонного типа.....	166
3.3. Регулирование и стабилизация перемещения свободно провисающей жилы с изоляцией в наклонной вулканизационной камере.....	181
3.4. Математическая модель и закономерности усиления электрического поля в локальных объемах диэлектрика с учетом формы проводящих микровключений.....	186

Содержание

3.5. Усиление электрического поля в диэлектрике возле выступа на токопроводящей поверхности и острия водного триинга.....	212
3.6. Расчет плотности зарядов на поверхности токопроводящих микровключений и токов в диэлектрике возле дефектов.....	217
3.7. Электромеханические напряжения в изоляции кабелей из-за силового взаимодействия электрического поля и ее водных и воздушных микровключений.....	223
3.8. Инвариантность параметров электрического поля при его возмущении проводящими микровключениями различных конфигураций.....	237

ГЛАВА 4

УСИЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ДИЭЛЕКТРИКАХ С БЛИЗКО РАСПОЛОЖЕННЫМИ ПРОВОДЯЩИМИ МИКРОДЕФЕКТАМИ.....	242
4.1. Изменение плотности электрических зарядов на поверхностях близко расположенных проводящих микровключений и напряженных объемов в диэлектрике.....	243
4.2. Закономерности возмущения электрического поля возле проводящих близко расположенных включений.....	257
4.3. Зависимость плотности токов от конфигураций близко расположенных микровключений и водных триингов.....	274
4.4. Электросиловое воздействие водных микровключений на полимерную изоляцию силовых кабелей.....	283
4.5. Зависимость возмущений электрического поля от дисперсности водных микровключений в изоляции кабелей	300
4.6. Усиление электрического поля возле проводящих включений с микротриингами на их поверхности.....	308
4.7. Электрическое поле в СПЭ изоляции возле триингов типа "нити жемчуга".....	318

Содержание

ГЛАВА 5

ВЗАИМОСВЯЗАННЫЕ МУЛЬТИФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В СПЭ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЕЙ ПРИ УЧЕТЕ ЕЕ НЕЛИНЕЙНЫХ СВОЙСТВ..... 331

- 5.1. Постановка задачи и оптимизация алгоритмов расчета взаимосвязанных процессов электродеградации полимерной изоляции кабелей..... 336
- 5.2. Влияние нелинейных свойств изоляции на интенсивность ее деградации и электрофизическая постановка задачи о распределении в ней электрического поля..... 349
- 5.3. Физико-математическая постановка задачи о расчете электрического поля в нелинейной СПЭ изоляции..... 360
- 5.4. Локальные усиления электрического поля проводящими включениями в нелинейной изоляции кабелей..... 368
- 5.5. Усиление электрического поля водными микротриингами в нелинейной СПЭ изоляции..... 377

ГЛАВА 6

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ИСПЫТАНИЙ КАБЕЛЬНЫХ СИСТЕМ НА НАПРЯЖЕНИЕ ДО 400 КВ..... 388

- 6.1. Электротехническая установка резонансного типа для испытаний сверхвысоковольтных кабелей низкочастотным переменным напряжением..... 388
- 6.2. Особенности применения резонансного контура в установках испытания сверхвысоковольтных кабельных систем..... 393
- 6.3. Моделирование и расчет параметров испытательной системы с последовательным резонансным контуром..... 400
- 6.4. Токи короткого замыкания и переходные процессы в резонансной системе при пробое изоляции в кабеле..... 409
- 6.5. Частичные разряды в изоляции сверхвысоковольтных кабелей с сегментированной жилой..... 417

Содержание

6.6. Высокочастотные процессы в изоляции кабелей при ее испытании на уровень частичных разрядов.....	423
6.7. Изменение электрического и температурного полей в СПЭ изоляции при возникновении частичных разрядов.....	435
6.8. Особенности электрофизических процессов в твердой полимерной изоляции силовых кабелей.....	445
 ГЛАВА 7	
РУКОВОДСТВО ПО СОЗДАНИЮ, ИСПЫТАНИЯМ И ЭКСПЛУАТАЦИИ СОВРЕМЕННЫХ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ НА НАПРЯЖЕНИЕ ДО 400 кВ РД К28-007:2017	450
7.1. Общие сведения о кабельных системах на напряжение до 400 кВ, которые производятся электротехнологическим комплексом ПАО "Завод Южкабель".....	450
7.2. Руководство по выбору кабелей.....	464
7.3. Инструкция по прокладке кабелей.....	493
7.4. Рекомендации по выбору и монтажу кабельных муфт.....	529
7.5. Испытания и эксплуатация кабельных линий.....	561
7.6. Правила безопасности при выполнении работ на кабельных сверхвысоковольтных линиях.....	570
Список использованных источников.....	573