

Руководство IEEE по проведению полевых испытаний экранированных силовых кабельных систем с номинальным напряжением 5 кВ и выше с использованием затухающего переменного напряжения (DAS)

Общество Электроэнергетики IEEE

При финансовой поддержке
Комитета по изолированным проводникам

IEEE
3 Park Avenue
New York, NY 10016-5997
USA
(США, штат Нью-Йорк,
Нью-Йорк, 3 Парк-авеню,
10016-5997)

Стандарт IEEE 400.4™-2015

IEEE Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Rated 5 kV and Above with Damped Alternating Current (DAC) Voltage

Sponsor

Insulated Conductors Committee
of the
IEEE Power and Energy Society

Approved 30 October 2015

IEEE-SA Standards Board

Abstract: The application of Damped AC (DAC) for field testing of power cables is described in this guide. DAC voltage withstand testing and diagnostic tests and measurements that are performed in combination with DAC voltage application in the field on shielded power cable systems are discussed. Whenever possible, cable systems are treated in a similar manner to individual cables. Tables and figures are included to show the effectiveness of the DAC ac voltage test, the diagnostic evaluation and the user experiences in the past years for field testing of different medium and (extra) high voltage cable system.

Keywords: after-laying testing, asset management, cable fault locating, cable system testing, cable testing, condition assessment, condition monitoring, damped ac voltage testing, diagnostic testing, dielectric losses, electric breakdown, grounding, high-voltage testing, IEEE 400.4™, IEEE Power and Energy Society, nondestructive testing, oil-filled cables, partial discharge measurement, power cable insulation, safety, tangent deltatesting.

The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 3
Park Avenue, New York, NY 10016-5997, USA

Copyright © 2015 by The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.
All rights reserved. Published 29 January 2016. Printed in the United States of America.

IEEE is a registered trademark in the U.S. Patent & Trademark Office, owned by The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Incorporated.

PDF: ISBN 978-0-5044-0641-3 STD20767
Print: ISBN 978-0-5044-0642-0 STDPD20767

IEEE prohibits discrimination, harassment, and bullying.

For more information, visit <http://www.ieee.org/web/aboutus/whatis/policies/p9-26.html>.

No part of this publication may be reproduced in any form, in an electronic retrieval system or otherwise, without the prior written permission of the publisher.

Important Notices and Disclaimers Concerning IEEE Standards Documents

IEEE documents are made available for use subject to important notices and legal disclaimers. These notices and disclaimers, or a reference to this page, appear in all standards and may be found under the heading “Important Notice” or “Important Notices and Disclaimers Concerning IEEE Standards Documents.”

Notice and Disclaimer of Liability Concerning the Use of IEEE Standards Documents

IEEE Standards documents (standards, recommended practices, and guides), both full-use and trial-use, are developed within IEEE Societies and the Standards Coordinating Committees of the IEEE Standards Association (“IEEE-SA”) Standards Board. IEEE (“the Institute”) develops its standards through a consensus development process, approved by the American National Standards Institute (“ANSI”), which brings together volunteers representing varied viewpoints and interests to achieve the final product. Volunteers are not necessarily members of the Institute and participate without compensation from IEEE. While IEEE administers the process and establishes rules to promote fairness in the consensus development process, IEEE does not independently evaluate, test, or verify the accuracy of any of the information or the soundness of any judgments contained in its standards.

IEEE does not warrant or represent the accuracy or content of the material contained in its standards, and expressly disclaims all warranties (express, implied and statutory) not included in this or any other document relating to the standard, including, but not limited to, the warranties of: merchantability; fitness for a particular purpose; non-infringement; and quality, accuracy, effectiveness, currency, or completeness of material. In addition, IEEE disclaims any and all conditions relating to: results; and workmanlike effort. IEEE standards documents are supplied “AS IS” and “WITH ALL FAULTS.”

Use of an IEEE standard is wholly voluntary. The existence of an IEEE standard does not imply that there are no other ways to produce, test, measure, purchase, market, or provide other goods and services related to the scope of the IEEE standard. Furthermore, the viewpoint expressed at the time a standard is approved and issued is subject to change brought about through developments in the state of the art and comments received from users of the standard.

In publishing and making its standards available, IEEE is not suggesting or rendering professional or other services for, or on behalf of, any person or entity nor is IEEE undertaking to perform any duty owed by any other person or entity to another. Any person utilizing any IEEE Standards document, should rely upon his or her own independent judgment in the exercise of reasonable care in any given circumstances or, as appropriate, seek the advice of a competent professional in determining the appropriateness of a given IEEE standard.

IN NO EVENT SHALL IEEE BE LIABLE FOR ANY DIRECT, INDIRECT, INCIDENTAL, SPECIAL, EXEMPLARY, OR CONSEQUENTIAL DAMAGES (INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO: PROCUREMENT OF SUBSTITUTE GOODS OR SERVICES; LOSS OF USE, DATA, OR PROFITS; OR BUSINESS INTERRUPTION) HOWEVER CAUSED AND ON ANY THEORY OF LIABILITY, WHETHER IN CONTRACT, STRICT LIABILITY, OR TORT (INCLUDING NEGLIGENCE OR OTHERWISE) ARISING IN ANY WAY OUT OF THE PUBLICATION, USE OF, OR RELIANCE UPON ANY STANDARD, EVEN IF ADVISED OF THE POSSIBILITY OF SUCH DAMAGE AND REGARDLESS OF WHETHER SUCH DAMAGE WAS FORESEEABLE.

Translations

The IEEE consensus development process involves the review of documents in English only. In the event that an IEEE standard is translated, only the English version published by IEEE should be considered the approved IEEE standard.

Official statements

A statement, written or oral, that is not processed in accordance with the IEEE-SA Standards Board Operations Manual shall not be considered or inferred to be the official position of IEEE or any of its committees and shall not be considered to be, or be relied upon as, a formal position of IEEE. At lectures, symposia, seminars, or educational courses, an individual presenting information on IEEE standards shall make it clear that his or her views should be considered the personal views of that individual rather than the formal position of IEEE.

Comments on standards

Comments for revision of IEEE Standards documents are welcome from any interested party, regardless of membership affiliation with IEEE. However, IEEE does not provide consulting information or advice pertaining to IEEE Standards documents. Suggestions for changes in documents should be in the form of a proposed change of text, together with appropriate supporting comments. Since IEEE standards represent a consensus of concerned interests, it is important that any responses to comments and questions also receive the concurrence of a balance of interests. For this reason, IEEE and the members of its societies and Standards Coordinating Committees are not able to provide an instant response to comments or questions except in those cases where the matter has previously been addressed. For the same reason, IEEE does not respond to interpretation requests. Any person who would like to participate in revisions to an IEEE standard is welcome to join the relevant IEEE working group.

Comments on standards should be submitted to the following address:

Secretary, IEEE-SA Standards Board
445 Hoes Lane
Piscataway, NJ 08854 USA

Laws and regulations

Users of IEEE Standards documents should consult all applicable laws and regulations. Compliance with the provisions of any IEEE Standards document does not imply compliance to any applicable regulatory requirements. Implementers of the standard are responsible for observing or referring to the applicable regulatory requirements. IEEE does not, by the publication of its standards, intend to urge action that is not in compliance with applicable laws, and these documents may not be construed as doing so.

Copyrights

IEEE draft and approved standards are copyrighted by IEEE under U.S. and international copyright laws. They are made available by IEEE and are adopted for a wide variety of both public and private uses. These include both use, by reference, in laws and regulations, and use in private self-regulation, standardization, and the promotion of engineering practices and methods. By making these documents available for use and adoption by public authorities and private users, IEEE does not waive any rights in copyright to the documents.

Photocopies

Subject to payment of the appropriate fee, IEEE will grant users a limited, non-exclusive license to photocopy portions of any individual standard for company or organizational internal use or individual, non-commercial use only. To arrange for payment of licensing fees, please contact Copyright Clearance Center, Customer Service, 222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923 USA; +1 978 750 8400. Permission to photocopy portions of any individual standard for educational classroom use can also be obtained through the Copyright Clearance Center.

Updating of IEEE Standards documents

Users of IEEE Standards documents should be aware that these documents may be superseded at any time by the issuance of new editions or may be amended from time to time through the issuance of amendments, corrigenda, or errata. An official IEEE document at any point in time consists of the current edition of the document together with any amendments, corrigenda, or errata then in effect.

Every IEEE standard is subjected to review at least every ten years. When a document is more than ten years old and has not undergone a revision process, it is reasonable to conclude that its contents, although still of some value, do not wholly reflect the present state of the art. Users are cautioned to check to determine that they have the latest edition of any IEEE standard.

In order to determine whether a given document is the current edition and whether it has been amended through the issuance of amendments, corrigenda, or errata, visit the IEEE-SA Website at <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/standards.jsp> or contact IEEE at the address listed previously. For more information about the IEEE-SA or IEEE's standards development process, visit the IEEE-SA Website at <http://standards.ieee.org>.

Errata

Errata, if any, for all IEEE standards can be accessed on the IEEE-SA Website at the following URL: <http://standards.ieee.org/findstds/errata/index.html>. Users are encouraged to check this URL for errata periodically.

Patents

Attention is called to the possibility that implementation of this standard may require use of subject matter covered by patent rights. By publication of this standard, no position is taken by the IEEE with respect to the existence or validity of any patent rights in connection therewith. If a patent holder or patent applicant has filed a statement of assurance via an Accepted Letter of Assurance, then the statement is listed on the IEEE-SA Website at <http://standards.ieee.org/about/sasb/patcom/patents.html>. Letters of Assurance may indicate whether the Submitter is willing or unwilling to grant licenses under patent rights without compensation or under reasonable rates, with reasonable terms and conditions that are demonstrably free of any unfair discrimination to applicants desiring to obtain such licenses.

Essential Patent Claims may exist for which a Letter of Assurance has not been received. The IEEE is not responsible for identifying Essential Patent Claims for which a license may be required, for conducting inquiries into the legal validity or scope of Patent Claims, or determining whether any licensing terms or conditions provided in connection with submission of a Letter of Assurance, if any, or in any licensing agreements are reasonable or non-discriminatory. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any patent rights, and the risk of infringement of such rights, is entirely their own responsibility. Further information may be obtained from the IEEE Standards Association.

Participants

At the time this IEEE guide was completed, the F05 Working Group had the following membership:

Edward Gulski, *Chair*
Ralph Patterson, *Vice Chair*

Manfred J. Bawart
Alain Bolliger
Wim Boone
Jacques Cote
John Densley
Jean-François Drapeau

Mark Fenger
Chris Grodzinski
Craig Goodwin
Wolfgang Hauschild
William Larzelere
Eberhard Lemke

Rafael Minassian
Hennig Oetjen
Frank Petzold
Benjamin Quak
Frank Vries
Hassan Younes

The following members of the individual balloting committee voted on this guide. Balloters may have voted for approval, disapproval, or abstention.

Saleman Alibhay
Thomas Barnes
Earle Bascom III
Martin Baur
William Bloethe
Alain Bolliger
Kenneth Bow
Andrew Brown
Kent Brown
Vern Buchholz
Kurt Clemente
Peter Coors
Glenn Davis
John Densley
Frank Di Guglielmo
Dieter Dohnal
Gary Donner
Frank Gerleve
David Gilmer
Craig Goodwin
Steven Graham
Randall Groves
Edward Gulski
Ajit Gwal
Richard Harp

Wolfgang Hauschild
Jeffrey Helzer
Lee Herron
Lauri Hiiuala
Werner Hoelzl
Rene Hummel
A. Jones
Rogier Jongen
Boris Kogan
Richard Kolich
Robert Konnik
Axel Kraemer
Alexander Kraetge
Jim Kulchisky
Chung-Yiu Lam
William Larzelere
Michael Lauxman
William Lockley
Arturo Maldonado
John Mcalhaney Jr
William McDermid
Tom Melle
John Merando
Rafael Minassian
Jerry Murphy

Arthur Neubauer
Michael Newman
Charles Ngethe
Joe Nims
Lorraine Padden
Christopher Petrola
Benjamin Quak
Robert Resuali
Johannes Rickmann
Michael Roberts
Bartien Sayogo
Paul Seitz
Michael Smalley
Jerry Smith
David Tepen
Nijam Uddin
Roger Verdolin
John Vergis
Martin Von Herrmann
Frank Vries
Yingli Wen
Kenneth White
Dawn Zhao
Tiebin Zhao
J. Zimnoch

When the IEEE-SA Standards Board approved this guide on 30 October 2015, it had the following membership:

John D. Kulick, *Chair*
Jon Walter Rosdahl, *Vice Chair*
Richard H. Hulett, *Past Chair*
Konstantinos Karachalios, *Secretary*

Masayuki Ariyoshi
Ted Burse
Stephen Dukes
Jean-Philippe Faure
J. Travis Griffith
Gary Hoffman
Michael Janezic

Joseph L. Koepfinger*
David J. Law
Hung Ling
Andrew Myles
T. W. Olsen
Glenn Parsons
Ronald C. Petersen
Annette D. Reilly

Stephen J. Shellhammer
Adrian P. Stephens
Yatin Trivedi
Phillip Winston
Don Wright
Yu Yuan
Daidi Zhong

*Member Emeritus

Introduction

This introduction is not part of IEEE Std 400.4™-2015, IEEE Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Rated 5 kV and Above with Damped Alternating Current (DAC) Voltage.

This new guide provides an overview of an available method for performing electrical tests in the field on shielded power cable systems using damped alternating current (DAC) voltages. It is intended to help the reader select a test that is appropriate for a specific situation of interest. It provides a brief description of the use of DAC voltage sources to perform field tests with a short discussion of specific tests. The material presented is descriptive and tutorial. Based on the current state of the art using this testing method, the guide addresses the evaluation of test results, the specification of test voltage levels and time of application.

If applicable, additional details are provided in the omnibus standard, IEEE Std 400™¹, IEEE Guide for Field Testing and Evaluation of the Insulation of Shielded Power Cable Systems Rated 5 kV and Above, or in “point” documents, such as IEEE 400.1™, IEEE Guide for Field Testing of Laminated Dielectric, Shielded Power Cable Systems Rated 5 kV and Above with High Direct Current Voltage; IEEE 400.2™, IEEE Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Using Very Low Frequency (VLF); and IEEE 400.3™, IEEE Guide for Partial Discharge Testing of Shielded Power Cable Systems in a Field Environment.

¹ Information on references can be found in Clause 2.

Содержание

1. Общие сведения	1
1.1 Введение.....	1
1.2 Область применения.....	2
1.3 Цель.....	2
2. Ссылки на нормативную документацию.....	2
3. Определения, сокращения и аббревиатуры	3
3.1 Определения.....	3
3.2 Сокращения и аббревиатуры	5
4. Правила техники безопасности	6
5. Испытания путем подачи затухающего переменного напряжения	8
5.1 Общие сведения	8
5.2 Типы испытаний с использованием затухающего переменного напряжения.....	10
6. Цепь и параметры испытания с использованием затухающего переменного напряжения	12
6.1 Общие сведения	12
6.2 Цепь испытательного напряжения с использованием затухающего переменного напряжения.....	13
6.3 Параметры затухающего переменного напряжения.....	14
7. Испытание на электрическую прочность путем подачи затухающего переменного напряжения	15
7.1 Общие сведения	15
7.2 Параметры и процедуры испытания путем подачи затухающего переменного напряжения	17
7.3 Критерии оценки затухающего переменного напряжения	18
8. Измерение частичного разряда путем подачи затухающего переменного напряжения	18
8.1 Общие сведения	18
8.2 Характеристики частичного разряда	20
8.3 Критерии оценки частичного разряда.....	20
9. Оценка коэффициента затухания ($\text{tg } \delta$) путем подачи затухающего переменного напряжения	20
9.1 Общие сведения	20
9.2 Параметры коэффициента затухания.....	22
9.3 Критерии оценки коэффициента затухания	22
10. Выводы	24
Приложение А (справочное) Уровни испытательного затухающего переменного напряжения и процедуры испытаний	25
Приложение В (справочное) Оценка коэффициента затухания для затухающего переменного напряжения	29
Приложение С (справочное) Параметры затухающего переменного напряжения	31
Приложение D (справочное) Пример оценки частичного разряда для испытаний после прокладки кабеля и эксплуатационных испытаний	36
Приложение E (справочное) Результаты Международного опроса на тему использования затухающего переменного напряжения для испытания кабелей питания СН и (С)ВН	40
Приложение F (справочное) Библиографический список	43

Руководство IEEE по проведению полевых испытаний экранированных кабельных систем с номинальным напряжением 5 кВ и выше с использованием затухающего переменного напряжения (DAC)

ВАЖНОЕ ПРИМЕЧАНИЕ: стандарты IEEE не учитывают требования к безопасности, защите, охране труда и окружающей среды, ограничению помех, создаваемых другими устройствами или цепями. Специалисты по внедрению стандартов IEEE обязаны определить и предусмотреть все необходимые меры по обеспечению безопасности, защиты, охраны труда и окружающей среды, помехозащиты, а также соблюдать все применимые законы и правила.

При использовании настоящего документа IEEE необходимо помнить о важных примечаниях и правовых оговорках. Данные примечания и оговорки включены во все публикации, содержащие ссылки на настоящий документ, и отмечены словами «Важное примечание» или «Важные примечания и оговорки, касающиеся документации IEEE». Кроме того, их можно получить в организации IEEE по запросу или просмотреть на сайте: <http://standards.ieee.org/IPR/disclaimers.html>.

1. Общие сведения

1.1 Введение

Настоящее руководство содержит описание методов и практик, которые должны применяться во время полевых испытаний экранированных кабельных систем с использованием затухающего переменного напряжения (DAC).

Испытание путем подачи затухающего переменного напряжения является одним из альтернативных методов испытания переменным напряжением и подходит для кабелей среднего напряжения (СН), высокого напряжения (ВН) и сверхвысокого напряжения (СВН). Поскольку подача затухающего переменного напряжения используется в диагностических, эксплуатационных и приемочных (пусковых) испытаниях уже несколько лет, данный подход позволяет оценить состояние изоляции и получить более полную информацию о состоянии кабельных систем.

При описании испытаний в настоящем руководстве затухающее переменное напряжение имеет частоту от 20 Гц до 500 Гц [B12], [B14], [B16], [B31], [B45], [B78]¹.

В настоящем руководстве содержится информация о методологии, уровнях напряжения и процедурах испытания, а также других факторах, которые необходимо учитывать при использовании затухающего переменного напряжения (как при испытаниях на электрическую прочность, так и при диагностических испытаниях).

¹Значения в скобках соответствуют номерам в библиографическом списке, Приложение F.

Общие сведения о других методах полевых испытаний приведены в обобщающем стандарте IEEE 400™².

1.2 Область применения

В настоящем руководстве описаны методы и процедуры испытания и диагностики экранированных кабельных систем с номинальным напряжением 5 кВ и выше с использованием затухающего переменного напряжения. Приведенная информация распространяется на все виды кабельных систем, предназначенных для передачи или распределения электрической энергии. В таблице указаны значения испытательного напряжения для кабельных систем с цепью заземления нейтрали или заземленным металлическим экраном.

1.3 Цель

В настоящем руководстве сформулированы унифицированные методы и процедуры проведения автономных испытаний смонтированных экранированных кабельных систем путем подачи (затухающего переменного) напряжения в полевых условиях, а также указания по оценке результатов испытаний. Поскольку приведенные значения параметров испытаний и конкретные процедуры требуют дополнительного изучения и уточнения, настоящее руководство должно рассматриваться в качестве отправной точки, а приведенная в нем информация должна дополняться по мере появления и анализа опыта в условиях эксплуатации.

2. Ссылки на нормативную документацию

Ниже приведен перечень справочных документов, которые необходимо использовать во время работы с настоящим документом (т.е. нужно знать и соблюдать их требования, поэтому в тексте приведены все ссылочные документы, связанные настоящим документом). Для датированных ссылок применяют только указанную версию. Для недатированных ссылок применяют последнее издание ссылочного документа (включая все его изменения и исправления).

Уполномоченный комитет по стандартизации, C2-2012, Национальные правила электробезопасности (National Electrical Safety Code®, NESC®).^{3,4}

ASTM D150-11, Стандартные методы определения диэлектрической проницаемости и диэлектрических потерь твердых электроизоляционных материалов при переменном токе.⁵

IEC 60060-3, Технология испытаний высоким напряжением. Часть 3. Определения и требования к испытаниям на месте.⁶

IEC 60270, Технология испытаний высоким напряжением. Измерение частичных разрядов.

IEC 60885-3, Методы электрических испытаний электрических кабелей. Часть 3. Методы испытаний для измерения частичных разрядов на длинах экструдированных силовых кабелях.

IEC 61230 Работы, выполняемые под напряжением. Переносное оборудование для заземления или для заземления и закорачивания.

IEEE Std 4™, Стандарт IEEE на методы испытаний высоким напряжением.

² Информацию о ссылочных документах можно найти в пункте 2.

³ Стандарты и продукты IEEE, упомянутые в данном пункте, являются торговыми марками Института инженеров электротехники и электроники.

⁴ Публикации IEEE можно получить в Институте инженеров электротехники и электроники, 445 Хоуз Лейн, Пискатауэй, Нью-Джерси, США 08854 (<http://standards.ieee.org/>).

⁵ Публикации ASTM можно получить в Американском обществе по испытанию материалов, 100 Барр Харбор Драйв, абонентский ящик C700, Западный Коншохокен, Пенсильвания 19428-2959, США (<http://www.astm.org/>).

⁶ Публикации IEC можно получить в Отделе продаж Международной электротехнической комиссии, 3 Рю де Варембе, абонентский ящик 131, СН-1211, Женева 20, Швейцария (<http://www.iec.ch/>). В США публикации IEC также можно получить в Отделе продаж Американского национального института стандартов, 25 Вест Стрит 43, 4-й этаж, Нью-Йорк, штат Нью-Йорк 10036, США (<http://www.ansi.org/>).

Руководство IEEE по проведению полевых испытаний экранированных кабельных систем с номинальным напряжением 5 кВ и выше путем подачи затухающего переменного напряжения (DAC)

IEEE Std 400.3™, Руководство IEEE по измерению частичных разрядов экранированных кабельных систем в полевых условиях.

IEEE Std 510™, Рекомендации IEEE по безопасности при проведении испытаний при высоком напряжении и высокой мощности.

NFPA 70E, Стандарт электробезопасности на рабочем месте.⁷

3. Определения, сокращения и аббревиатуры

3.1 Определения

Ниже приведен перечень терминов и определений, используемых в настоящем документе.

Термины, отсутствующие в данном разделе, можно найти в *Онлайн-словаре стандартов IEEE*.⁸

Пробой: разрушающий разряд, проходящий через или вдоль изоляции и приводящий к возникновению пробивного напряжения.

Кабельная система: одна или несколько соединенных вместе секций экранированного силового кабеля с номинальным напряжением 5 кВ и выше, включая кабельную арматуру (соединительные муфты и концевые заделки).

Длительность зарядки t_c в секундах: время, необходимое для зарядки емкости испытуемого объекта C_{TO} до тех пор, пока испытательное напряжение не достигнет уровня V_{DAC} при заданном максимальном токе I_{Cmax} .

Собственная частота цепи f_r в герцах: величина, обратная промежутку времени между прохождением двух последовательных максимумов, которая зависит от C_{TO} и L_c и в большинстве случаев рассчитывается по формуле $f_r = 1/2\pi \sqrt{L_c C_{TO}}$

Возбуждение затухающего переменного напряжения: процедура подачи испытательного напряжения в силовую кабель, величина которого постепенно увеличивается до выбранного максимального уровня испытательного напряжения (этап 1), и затухание синусоидальных (косинусоидальных) колебаний при собственной частоте цепи и заданном коэффициенте затухания (этап 2).

Измерение частичных разрядов путем подачи затухающего переменного напряжения: тип полевого испытания, основной целью которого является получение информации о наличии и характеристиках частичного разряда (PD) в испытуемой части кабеля.

Процедура испытания на электрическую прочность путем подачи затухающего переменного напряжения: процедура подачи затухающего переменного напряжения (путем возбуждения затухающего переменного напряжения с помощью повышенного уровня напряжения), после которой выполняется стабилизация затухающего переменного напряжения за счет серии последовательных возбуждений затухающего переменного напряжения, осуществляемых путем подачи напряжений определенных уровней на испытуемый силовой кабель.

Затухающее переменное напряжение: напряжение, изменяющееся от максимального (отрицательного или положительного) уровня до нулевого уровня по синусоидальному закону. Оно характеризуется пиковым значением V_{DAC} , собственной частотой цепи f_r и коэффициентом затухания D_f .

Процентное значение коэффициента затухания D_f : разность значений напряжений в первом и втором максимумах, деленная на значение напряжения в первом максимуме.

⁷ Публикации NFPA можно получить в Отделе продаж публикаций Национальной ассоциации противопожарной защиты, 1 Баттермарш парк, абонентский ящик 9101, Куинси, Массачусетс 02269-9101, США (<http://www.nfpa.org/>).

⁸ Подписка на *Онлайн-словарь стандартов IEEE* доступна по ссылке: <http://dictionary.ieee.org/>.

Электрический тринг: рост древовидных разрядных структур, представляющих собой несплошные или обугленные микроструктуры, которые могут возникать при увеличении нагрузки, в частности, при перегибах, попадании посторонних включений, наличии пор или воздействии водного тринга на сухую изоляцию, подвергающуюся электростатическому напряжению в течение длительного времени. Электрический тринг приводит к неустраняемому повреждению изоляции. Если напряжение, создающее нагрузку на электрический тринг, превышает уровень возникновения частичных разрядов, это приводит к возникновению частичного разряда, росту древовидных структур и неизбежному отказу.

Гибридная кабельная система: кабельная система, состоящая из кабелей с сильно различающимися диэлектрическими или конструктивными характеристиками, например, кабелей с экструдированной диэлектрической изоляцией и кабелей со слоистой изоляцией или кабелей с/без заполнения.

Слабое место (изоляции): часть системы изоляции кабеля, в которой при подаче определенного напряжения и под действием одного или нескольких факторов (механическое, химическое или термическое напряжение) пробой изоляции проходит раньше, чем в других частях системы. Слабое место изоляции, которое приводит к пробоем при рабочем напряжении, иногда называют существенным дефектом.

Слоистые диэлектрики: изоляция, располагаемая слоями и изготавливаемая из пропитанных жидкостью лент бумаги и (или) полипропилена. В качестве примера можно привести кабели с бумажной изоляцией и свинцовой оболочкой (PILC), неосушенные кабели, пропитанные в массе (MIND), кабели высокого давления в трубопроводе и кабели с каналом в токоведущей жиле.

Частичный разряд (PD): локализованный электрический разряд, частично шунтирующий изоляцию между проводниками.

Импульс частичного разряда (PD): высокочастотный импульс тока, возникающий в результате частичного разряда. В экранированном кабеле питания импульс распространяется от источника частичного разряда по кабелю в обоих направлениях.

Экранированный кабель: кабель, в котором изолированный проводник проходит внутри заземленной проводящей оболочки.

Испытания: в настоящем руководстве рассматривается несколько категорий испытаний:

- a) **автономные испытания:** испытываемая кабельная система отключается от эксплуатационного источника питания и подключается к отдельному источнику питания, используемому при проведении полевых испытаний.

С точки зрения применения существует три категории испытаний:

- 1) **установочное испытание:** полевое испытание, проводимое после монтажа кабеля, но до установки соединительных муфт и концевых заделок;
- 2) **приемочное испытание:** полевое испытание, проводимое после монтажа кабельной системы с концевыми заделками и соединительными муфтами, но до ввода кабельной системы в нормальную эксплуатацию;
- 3) **эксплуатационное испытание:** полевое испытание, проводимое во время эксплуатации кабельной системы.

- b) С технической точки зрения существует три основных набора испытаний:

- 1) **диагностическое испытание:** полевое испытание, которое проводится в течение срока эксплуатации кабельной системы, чтобы оценить состояние кабельной системы и в некоторых случаях локализовать разрушившиеся части, способные привести к отказу;
- 2) **контролируемое испытание на электрическую прочность:** диагностическое испытание, в котором используется напряжение определенной величины, соответствующей этапам увеличения и стабилизации напряжения во время испытания на электрическую прочность. Во время испытания также контролируются другие свойства испытываемого объекта, позволяющие определить его состояние и оценить необходимость увеличения или уменьшения продолжительности испытания;

- 3) **неконтролируемое или простое испытание на электрическую прочность:** диагностическое испытание, в котором используется напряжение определенной величины, соответствующей этапам увеличения и стабилизации напряжения во время испытания на электрическую прочность. Испытание считается пройденным при отсутствии повреждений на испытуемом объекте.

Уровень пикового напряжения V_{DAC} в киловольтах: фактический уровень испытательного затухающего переменного напряжения, равный фактическому выбранному уровню напряжения V_T , поскольку оно должно быть сгенерировано системой DAC.

ПРИМЕЧАНИЕ — С практической точки зрения и в связи с тем, что технические условия испытания кабелей приведены в виде среднеквадратических значений (кВ), то V_{DAC} можно также определить как:

$$V_I / \sqrt{2} \text{ (кВ}_{\text{ср.-кв.}}\text{)}.^9$$

3.2 Сокращения и аббревиатуры

DAC	затухающее переменное напряжение (в настоящем руководстве его частота находится в диапазоне от 20 Гц до 500 Гц)
D_f	коэффициент затухания затухающего переменного напряжения
CBH	сверхвысокое напряжение
f_r	собственная частота затухающего переменного напряжения
DF	коэффициент затухания или тангенс угла потерь ($\tan \delta$)
BH	высокое напряжение
MIND	неосушенный кабель, пропитанный в массе
CH	среднее напряжение
N_{DAC}	количество воздействий затухающим переменным напряжением
MH	маслонаполненный кабель
PD	частичный разряд
PDEV	напряжение гашения частичных разрядов, V_e
PDIV	напряжение возникновения частичных разрядов, V_i
PILC	кабель с бумажной изоляцией и свинцовой оболочкой
TDR	рефлектометрия с временным разрешением
U_n	номинальное среднеквадратическое значение напряжения кабеля питания (между фазами)
U_o	номинальное среднеквадратическое значение рабочего напряжения (между фазой и землей)
V_T	пиковое испытательное напряжение (между фазой и землей)

⁹Примечания в тексте, таблицы и значения, приведенные в стандарте, даны исключительно в информационных целях и не должны рассматриваться как требования, необходимых для внедрения данного стандарта.

4. Правила техники безопасности

ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ

При проведении испытаний, связанных с опасными уровнями напряжения, особое внимание необходимо уделить повышению безопасности персонала. Безопасность персонала имеет первостепенное значение при выполнении всех процедур испытания. Все испытания кабелей и оборудования должны выполняться на обесточенных и изолированных системах за исключением случаев, когда это необходимо и разрешено. Крайне важно всегда предпринимать соответствующие меры предосторожности. При необходимости следует также соблюдать правила техники безопасности, приведенные в следующих документах:

- a) Применимые рабочие процедуры обеспечения безопасности пользователей
- b) Стандарт IEEE Std 510, рекомендации IEEE по безопасности при проведении испытаний при высоком напряжении и высокой мощности
- c) Национальные правила электробезопасности (National Electrical Safety Code®, NESC®), C2-2012, уполномоченный комитет по стандартизации
- d) Стандарт электробезопасности на рабочем месте NFPA 70E
- e) Применимые национальные, государственные и местные правила техники безопасности
- f) Требования по защите собственности коммунальных предприятий и заказчиков

При проведении полевых испытаний кабельных систем при высоком напряжении необходимо учитывать все факторы, связанные с работой с цепями под напряжением, и специфические условия, требующие дополнительного рассмотрения.

Как правило, один или несколько концов кабельной цепи расположен на некотором расстоянии от испытательного оборудования и человека, проводящего проверку. Для обеспечения безопасности персонала данные концы необходимо зафиксировать на безопасном расстоянии от других токоведущих частей. Необходимо обеспечить связь между такими участками и местом работы испытателя.

Для того чтобы убедиться в том, что цепь полностью обесточена, перед выполнением защитного заземления можно воспользоваться индикатором цепи или другим подходящим устройством.

Если испытываемые участки кабеля находятся в непосредственной близости от других проводников, находящихся под напряжением, необходимо принять соответствующие меры предосторожности для создания достаточного воздушного зазора. Невыполнение данного правила может привести к поверхностному пробое между испытываемым участком кабеля и другими проводниками, в частности, при подаче испытательного напряжения, превышающего номинальное рабочее напряжение. Если расстояние является минимально допустимым, могут потребоваться особые меры предосторожности, направленные на исключение возникновения поверхностного пробоя.

ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ

Особое внимание необходимо уделить специальным методикам снятия заряда с кабеля после завершения испытаний, чтобы исключить риск возникновения опасных ситуаций для персонала. Кабели имеют высокую емкость и абсорбционные характеристики диэлектрика. В незаземленных кабелях, подвергающихся испытаниям путем подачи высокого напряжения в течение достаточно длительного времени, после завершения таких испытаний может накапливаться опасный заряд, что связано с очень большой постоянной времени диэлектрической абсорбции. По этой причине необходимо выполнять заземление в соответствии с рекомендациями соответствующих документов.

При выполнении испытаний безопасность персонала имеет первостепенное значение. Безопасность персонала имеет первостепенное значение при выполнении всех процедур испытания. Все испытания кабелей и оборудования должны выполняться на обесточенных и изолированных системах за исключением случаев, когда это необходимо и разрешено. При необходимости следует также соблюдать правила техники безопасности, приведенные в вышеперечисленных документах.

Перед проведением испытаний необходимо определить безопасное расстояние до других токоведущих частей с учетом испытательного напряжения и напряжения в окружающем оборудовании:

Руководство IEEE по проведению полевых испытаний экранированных кабельных систем с номинальным напряжением 5 кВ и выше путем подачи затухающего переменного напряжения (DAS)

При использовании переключателей или выключателей для изоляции кабельной цепи от остальной части системы у производителя необходимо предварительно уточнять, способны ли данные устройства выдерживать испытательное затухающее переменное напряжение и обеспечивать изоляцию, когда другой конец находится под нормальным рабочим напряжением.

- Необходимо всегда контролировать процесс снятия заряда (заземления) кабеля, особенно это касается длинных кабелей, поскольку в данном случае процесс может протекать в течение нескольких десятков секунд.
- Если изоляция кабеля от источника питания, находящегося под напряжением, осуществляется за счет воздушного зазора, то, например, при снятии концевой заделки кабеля безопасное расстояние должно быть достаточным для обеспечения изоляции кабельной системой, находящейся под испытательным затухающим переменным напряжением, от окружающего оборудования, находящегося под нормальным сетевым напряжением.
- Выполнить блокировку и опломбирование оборудования, чтобы исключить возможность несанкционированного переключения изолирующего устройства и нарушения изоляции.
- Использовать соответствующие средства индивидуальной защиты (СИЗ).

Во время испытаний один или несколько концов кабелей могут находиться далеко от места проведения испытаний, в связи с чем перед началом испытания:

- концы испытываемых кабелей необходимо зафиксировать на безопасном расстоянии от других токоведущих частей
- обесточенные кабели необходимо заземлить до начала испытаний
- на дальние концы кабеля необходимо повесить таблички о проведении высоковольтного испытания.

После завершения высоковольтных испытаний необходимо:

- снять заряд с кабелей и кабельных систем, включая испытательное оборудование.
- соблюдать требования к заземлению для кабелей и испытательного оборудования, чтобы исключить вероятность повторного накопления заряда в кабеле из-за диэлектрической абсорбции и емкости.

Кабельные системы считаются обесточенными и заземленными, когда проводник и металлический экран подключены к системе заземления на испытательной площадке и, если это возможно, с помощью дальнего конца.

При испытаниях рекомендуется использовать *единое заземление системы на испытательной площадке* (см. рис. 1). Экран или оболочка испытываемого кабеля нужно подключить к заземлению системы. При отсутствии, ослаблении или разрыве данного соединения его необходимо незамедлительно восстановить. *Защитный кабель заземления должен соединять все корпуса испытательных приборов с заземлением системы.* Открытые токопроводящие части испытательной системы должны быть подключены к общей точке заземления. Поскольку прибор для проведения испытаний путем подачи затухающего переменного напряжения является высоковольтным устройством, для надежного заземления испытываемого кабеля следует использовать внешний защитный кабель заземления. Данный кабель должен быть способен выдерживать ток короткого замыкания системы. После подключения диагностического вывода испытательного оборудования DAS к испытываемому кабелю данное защитное заземление можно убрать, чтобы начать испытание.

Если для испытательного оборудования целесообразно или предпочтительно использовать местное заземление, то для обеспечения нулевого потенциала корпус должен быть подключен к заземлению системы.

Необходимо принять соответствующие меры предотвращения несанкционированного отсоединения заземляющих соединений. Рекомендуется использовать заземляющие соединения с высоким моментом затяжки. Рекомендуется применять портативные заземляющие зажимы и заземляющие приспособления, изготовленные и испытанные в соответствии со стандартом IEC 61230.

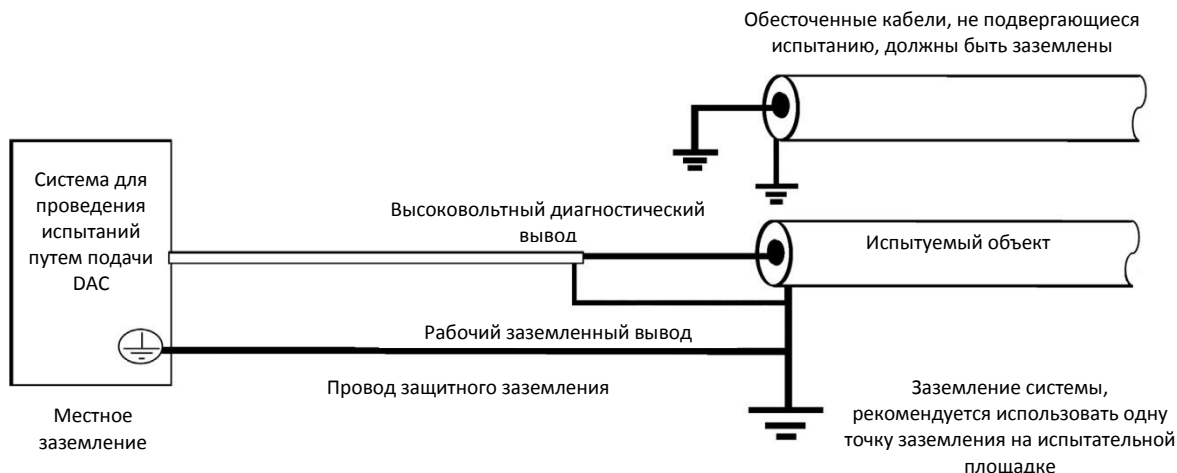


Рис. 1— Рекомендованная схема подключения для обеспечения безопасности при проведении испытаний путем подачи затухающего переменного напряжения

5. Испытания путем подачи затухающего переменного напряжения

5.1 Общие сведения

Испытание путем подачи затухающего переменного напряжения (DAC) синусоидальной формы (осциллирующего напряжения) было внедрено в конце 1980-х годов в качестве альтернативы испытаниям путем подачи постоянного напряжения [B3], [B4], [B5], [B6], [B12], [B13], [B15], [B19], [B23], [B25], [B28], [B31], [B45], [B56], [B58], [B59], [B60], [B65], [B66], [B67], [B70], [B71], [B79], [B82], [B83]. Используя полученный опыт проведения испытаний путем подачи переменного напряжения на местах эксплуатации и технологический прогресс в области силовой электроники и передовой обработки сигналов, испытания путем подачи затухающего переменного напряжения стали использоваться уже с конца 1990-х годов. В настоящее время в некоторых странах затухающее переменное напряжение используется при проведении испытаний на месте эксплуатации с измерением частичного разряда и оценкой коэффициента затухания (DF) для определения состояния всех типов кабельных систем [B9], [B31], [B73], [B76], приложение E.

Затухающее переменное напряжение генерируется путем зарядки испытуемого объекта до достижения заданного уровня напряжения, после чего выполняется разряд емкости испытуемого объекта через соответствующую катушку индуктивности. На этапе зарядки на емкость испытуемого объекта подается напряжение, которое постепенно возрастает со скоростью, зависящей от емкости испытуемого объекта и номинального тока источника питания. На этапе разрядки переменное напряжение, частота которого зависит от емкости и индуктивности испытуемого объекта (см. рис. 2), постепенно затухает.

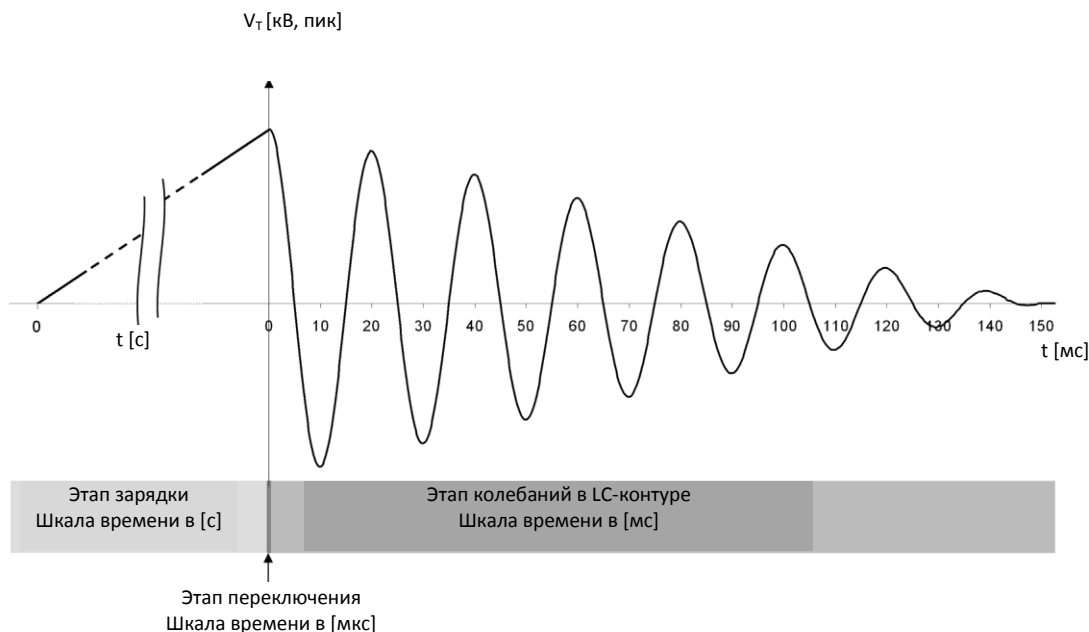


Рис. 2— Схематическое представление трех этапов одного воздействия затухающим переменным напряжением. Максимальный уровень затухающего переменного напряжения определяется значением пикового напряжения V_T в виде следующего соотношения: $V_T/V\sqrt{2}$ (среднеквадратическое значение в киловольтах)

В настоящее время большинство способов использования затухающего переменного напряжения основано на выполнении измерений электрической прочности и дополнительных диагностических величин [например, частичных разрядов (PD) и коэффициента затухания]. При испытаниях на электрическую прочность применяется заданное количество воздействий затухающим переменным напряжением [B9], [B14], [B16], [B52], [B72], (см. рис. 3)

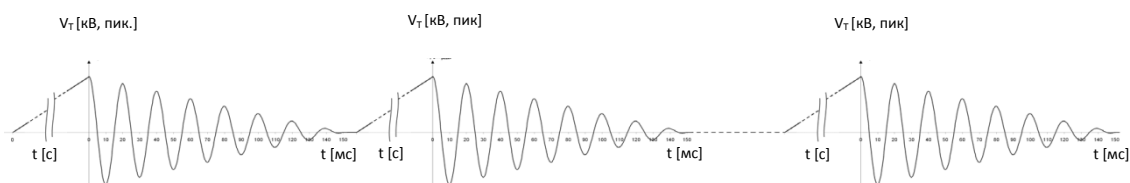


Рис. 3— Схематическое представление испытания на электрическую прочность за счет возбуждений затухающим переменным напряжением. Продолжительность испытания зависит от количества воздействий затухающим переменным напряжением на испытуемый кабель питания при выбранном испытательном напряжении DAC. Максимальный уровень выдерживаемого напряжения DAC определяется значениями пикового напряжения V_T в виде следующего соотношения: $V_T/V\sqrt{2}$ (среднеквадратическое значение в киловольтах для первого воздействия затухающим переменным напряжением).

Согласно [B3], [B4], [B5], [B6], [B9] [B12], [B14], [B15], [B16], [B31], [B45], [B69], [B71], [B72], [B78], [B79] и [B87] можно выделить следующие основные преимущества и недостатки испытаний путем подачи затухающего переменного напряжения:

Преимущества:

- Испытание на электрическую прочность путем подачи затухающего переменного напряжения с использованием определенного количества воздействий затухающим переменным напряжением дает возможность создавать пробой или частичный разряд в дефектных частях изоляции [B4], [B5].
- Данное испытание позволяет обнаружить различные дефекты в изоляции, которые в условиях эксплуатации будут иметь пагубные последствия для кабельной системы, не создавая новые дефекты и не вызывая существенное старение исправной изоляции [B18], [B20], [B69], [B81].
- Данное испытание демонстрирует сходство моделей и параметров частичного разряда между результатами испытаний путем подачи затухающего переменного напряжения и заводскими испытаниями путем подачи напряжения постоянной промышленной частоты (50/60 Гц) [B3], [B4], [B15], [B86], [B87].
- Данное испытание не требует сложных системы, является простым в использовании и эксплуатации.
- При проведении испытаний длинных кабелей путем подачи затухающего переменного напряжения от испытательного оборудования требуется относительно низкая входная мощность.

Недостатки:

- В связи с зарядкой и характеристикой затухания напряжения результаты испытаний на электрическую прочность и на пробой путем подачи затухающего переменного напряжения могут отличаться от результатов, полученных при испытании на электрическую прочность путем непрерывной подачи переменного напряжения, особенно в случае наличия частичного разряда (типично для неоднородных дефектов изоляции) [B32].
- Использование катушек с постоянной индуктивностью с различными емкостями кабелей приводит к изменению частоты затухающего переменного напряжения.
- Для поддержания частоты затухающего переменного напряжения в диапазоне от 20 Гц до 500 Гц при очень малых длинах кабелей требуется дополнительная емкостная нагрузка.
- Поскольку рекомендованные значения испытательного напряжения и продолжительности испытаний (приведенные в данном документе для испытаний путем подачи затухающего переменного напряжения, приложение А) основаны на результатах полевых испытаний, полученных различными пользователями, требуется продолжить сбор и оценку данных и добавить их во время следующего редактирования настоящего документа.
- Затухание переменного напряжения зависит от фактических диэлектрических потерь на конкретном участке кабеля.
- Длительность зарядки может различаться и зависит от емкости кабеля, уровня испытательного напряжения V_T и тока зарядки источника питания

5.2 Типы испытаний путем подачи затухающего переменного напряжения

На рис. 4 показаны варианты проведения полевых испытаний различных кабельных систем путем подачи затухающего переменного напряжения. Из этого следует, что в зависимости от целей испытаний можно использовать разные варианты.

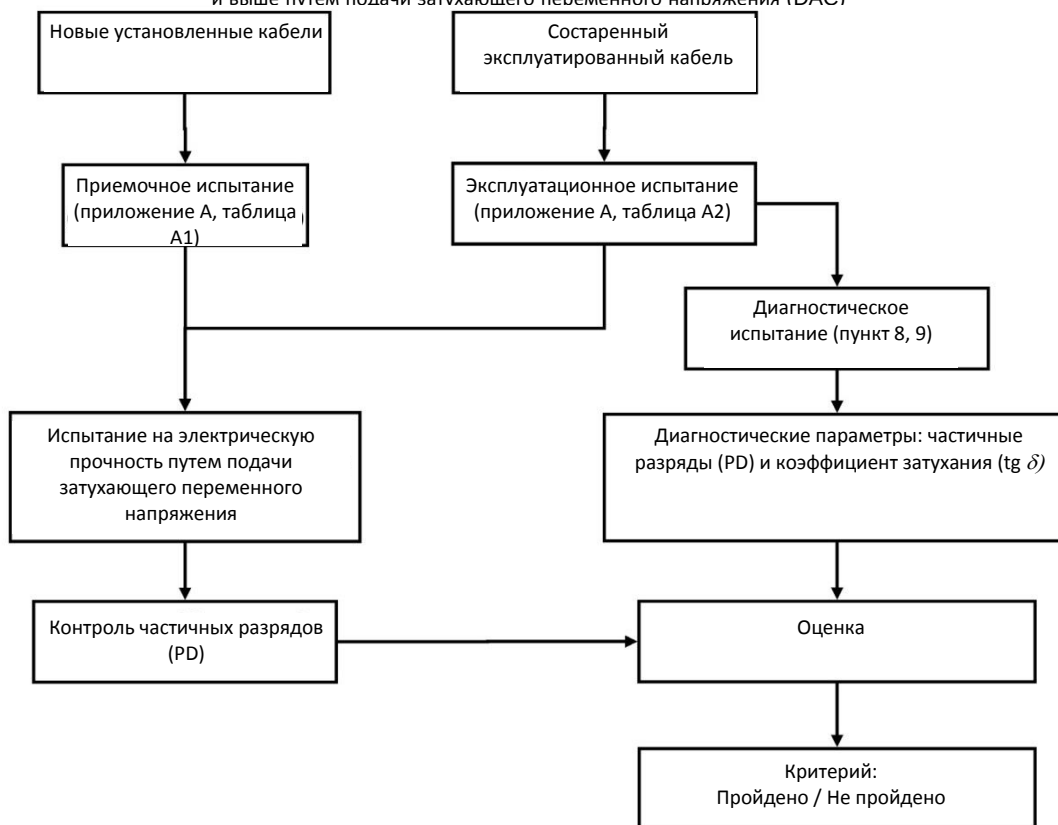


Рис. 4—Общее представление варианты проведения полевых испытаний кабельных систем путем подачи затухающего переменного напряжения для различных целей.

- *Приемочное испытание путем подачи затухающего переменного напряжения:* в соответствии с уровнями испытательного напряжения, указанными в таблице A.1, новые смонтированные кабельные системы могут быть подвергнуты контролируемым и (или) неконтролируемым испытаниям с 50 воздействиями затухающим переменным напряжением. Результаты, полученные за последние годы, показывают, что большинство приемочных испытаний путем подачи затухающего переменного напряжения контролируется путем обнаружения частичного разряда. В связи с тем, что данный способ находится на стадии разработки, эффективность и верификация испытания на электрическую прочность путем подачи затухающего переменного напряжения основаны на следующих документах [B4], [B15], [B75], [B81]. Результаты, полученные за последние десять лет, представляют ценность, однако для доведения методики до совершенства требуется сбор дополнительных данных, оценка и определение основных критериев [B32]. Этот опыт должен быть учтен в следующей версии настоящего документа.
Перед началом приемочного испытания путем подачи затухающего переменного напряжения в зависимости от потребностей пользователей для проверки качества монтажа может быть выполнено установочное испытание новых участков кабеля. После окончевания или подключения кабеля к общей кабельной системе, готовую к вводу в эксплуатацию, вместо установочного испытания нужно провести приемочные или эксплуатационные испытания.
- *Эксплуатационное испытание путем подачи затухающего переменного напряжения:* в соответствии с уровнями испытательного напряжения, указанными в таблице A.2, эксплуатируемые или отремонтированные/модернизированные кабельные системы могут быть подвергнуты контролируемым или неконтролируемым испытаниям с 50 воздействиями затухающим переменным напряжением. Результаты, полученные за последние годы, показывают, что большинство эксплуатационных испытаний путем подачи затухающего переменного напряжения контролируется путем обнаружения частичного разряда и (или) измерения коэффициента затухания.

Руководство IEEE по проведению полевых испытаний экранированных кабельных систем с номинальным напряжением 5 кВ и выше путем подачи затухающего переменного напряжения (DAC)

- *Диагностическое испытание путем подачи затухающего переменного напряжения.* в соответствии с уровнями испытательного напряжения, указанными в таблице A.1 и таблице A.2, а также собственными процедурами испытаний пользователя, эксплуатируемые кабельные системы могут подвергаться периодическим испытаниям для оценки их состояния, например, путем измерения частичного разряда и (или) коэффициента затухания.

6. Цепь и параметры испытания путем подачи затухающего переменного напряжения

6.1 Общие сведения

Для генерирования затухающего переменного напряжения могут применяться различные типы испытательных цепей [B5], [B9], [B16], [B21], [B29], [B30], [B51], [B73], [B78], [B86]. В настоящем документе для пояснения принципов генерирования затухающего переменного напряжения будет использоваться базовая цепь, изображенная на рис. 5. Цепь испытания путем подачи затухающего переменного напряжения состоит из источника высокого напряжения (ВН), генерирующего постоянно увеличивающееся однополярное напряжение (см. рис. 2), индуктора ВН с индуктивностью в несколько генри [Гн], емкостного испытуемого объекта и подходящего переключателя ВН (см. рис. 5). Емкостный испытуемый объект может состоять из одного или нескольких емкостных испытуемых объектов, в т.ч. кабелей питания или генераторов. Несмотря на то, что кабель имеет распределенные параметры, для упрощения используется модель сосредоточенной емкости. Когда однополярное напряжение зарядки достигает максимального значения V_T , контакты переключателя ВН замыкаются, генерируя затухающее переменное напряжение на емкостном испытуемом объекте. Коэффициент затухания зависит от характеристик потери испытательной цепи и испытуемого объекта. Собственная частота (f_r) цепи DAC определяется параметрами индуктора ВН и емкости испытуемого объекта. Ниже определенного значения емкости испытуемого объекта собственная частота колебаний будет превышать допустимые значения. Для этих случаев параллельно к цепи можно подключить дополнительная накопительная емкость ВН.

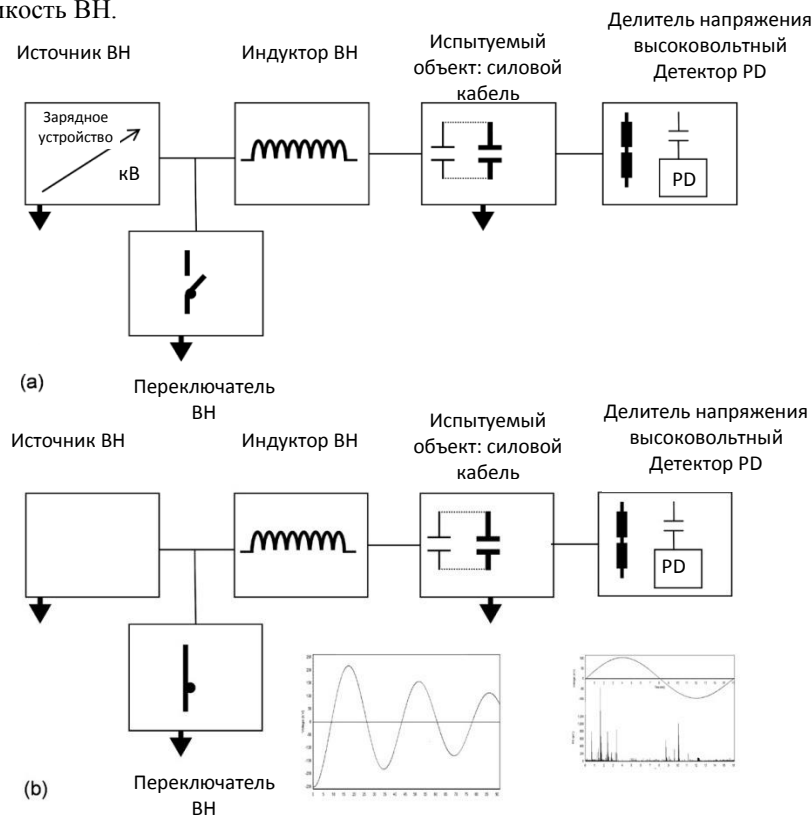


Рис. 5—Схематическое представление базовой цепи испытания путем подачи затухающего переменного напряжения с контролем: (а) этапа зарядки цепи и (б) этапа колебаний в LC-контуре. В случае контролируемого испытания можно измерить такие параметры, как частичный разряд и коэффициент затухания.

6.2 Цепь испытательного напряжения путем подачи затухающего переменного напряжения

6.2.1 Общие сведения

Базовые принципы испытательных цепей путем подачи затухающего переменного напряжения показаны на рис. 5, а на рис. 6.3 определены параметры, характеризующие испытательную цепь путем подачи затухающего переменного напряжения. Весь процесс возбуждения затухающего переменного напряжения состоит из трех этапов (см. также рис. 2)

6.2.1.1 Этап зарядки:

Во время этого этапа на испытуемый объект подается увеличивающееся однополярное (положительное или отрицательное) напряжение. Длительность зарядки зависит от максимально допустимого тока нагрузки источника питания, испытательного напряжения и емкости испытуемого объекта.

По данным публикации Крюгера, 1995 [B53], в кабеле не возникает опасное постоянное напряжение или устойчивое состояние стресса, если напряжение будет непрерывно увеличиваться до срабатывания переключателя ВН. В результате образования объемных зарядов в изоляции кабеля будет более вероятно при частоте ниже 0,01 Гц и при электрическом напряжении больше 10 кВ/мм [B80]. Ссылаясь на публикации Диссато и соавт. [B13] и Такада [B80], величина обнаруженного объемного заряда является функцией зависимости от частоты и возникает при частотах ниже 0,01 Гц для приложенного электрического поля [B47]. Например, при подаче на изоляцию высокого напряжения постоянного тока (HVDC), а не затухающего переменного напряжения (DAC), по данным публикации Крюгера, 1995 [B53], распределение первичного напряжения будет емкостным и будет медленно уменьшаться до резистивного распределения с постоянной времени, характерной для изоляции из сшитого полиэтилена (диэлектрическая проницаемость ϵ_r , ϵ_0 , умноженная на удельное объемное сопротивление ρ).

$$2,3 \times 8,85 \times 10^{-12} \text{ Ф/м} \times 10^{14} \text{ Ом} = 2035 \text{ с}.$$

В результате в гипотетическом случае высокого напряжения постоянного тока (только постоянный уровень напряжения) постоянная времени, необходимая для этого переключения, будет составлять более 33 минут. Поскольку продолжительность этапа зарядки DAC значительно меньше этого времени при уровнях испытательного напряжения, указанных в таблице A.1 и таблице A.2 (см. приложение A), напряженность электрического поля будет оставаться ниже критических значений [B13], [B80] не только в течение одного воздействия затухающим переменным напряжением, но и в течение нескольких циклов, которые обычно применяются во время испытания на электрическую прочность путем подачи затухающего переменного напряжения. В результате в кабеле достаточно создать напряжение возбуждения с помощью переменного тока. Во избежание побочных эффектов, связанных с длительностью однополярного возбуждения и возможного распространения объемного заряда, рекомендуется использовать время возбуждения, не превышающее 100 с. Если это невозможно, следует увеличить питающий ток зарядки, чтобы сократить длительность зарядки. В качестве альтернативы можно использовать процедуру биполярной зарядки (путем подачи положительного и отрицательного напряжения) и подходящий источник высокого напряжения.

6.2.1.2 Этап переключения:

Когда однополярное напряжение зарядки с заданной скоростью линейного изменения напряжения dU/dt достигает выбранного максимального уровня испытательного напряжения V_T (напряжение зарядки), контакты переключателя ВН мгновенно замыкаются, обеспечивая короткое время включения, например, менее 1 мкс. Это необходимо для того, чтобы избежать перенапряжения переключения и помех при измерениях частичных разрядов. Емкость кабеля и индуктивность ВН системы образуют колебательный LC-контур. Максимальный результирующий затухающий переменный ток, протекающий в LC-контуре, является функцией зависимости от фактической емкостной нагрузки, индуктивности системы и максимального испытательного напряжения.

6.2.1.3 Этап затухания колебаний в LC-контуре:

Частота испытательного затухающего переменного напряжения равна собственной частоте цепи.

Затухание переменного напряжения зависит от коэффициента качества всей резонансной цепи. Коэффициент качества обратно пропорционален потерям цепи с переключателем ВН, потерям в кабельной системе и потерям испытательного индуктора.

Благодаря симметричному биполярному процессу разрядки при использовании переменного тока, на этапе колебаний в изоляции кабеля не будет остаточного заряда.

В результате относительно низкой индуктивности кабеля и отсутствия переходного перенапряжения из-за отражений на соединительных муфтах и концевых заделках затухающее переменное напряжение, приложенное к емкости кабеля и создающее частичный разряд, представляет собой нормальное условие для переменного напряжения. Это означает, что напряжение возникновения частичных разрядов (PDIV), амплитуда частичных разрядов и поведение частичных разрядов сопоставимы с условиями заводских испытаний, а следующие ссылочные документы демонстрируют, что затухающее переменное напряжение аналогично для неоднородных дефектов изоляции [B54], [B69], [B86], [B87].

В случае изоляции без частичного разряда подача затухающего переменного напряжения будет иметь такой же результат, что и в условиях заводских испытаний с точки зрения прохождения/непрохождения испытания [B54].

Коэффициент затухания можно оценить на основании характеристик затухания волны затухающего переменного напряжения, что отмечено в публикации Хаутелена и соавт. [B34], стандарте IEEE Std 386™ [B44] и приложении В.

Измерение испытательного напряжения должно выполняться с использованием утвержденной измерительной системы, описанной в стандартах IEEE Std 4 и IEC 60060-3. Общая погрешность пикового значения испытательного напряжения не должна выходить за пределы $\pm 5\%$, а время отклика измерительной системы не должно превышать 0,5 с.

6.3 Параметры затухающего переменного напряжения

Для испытания цепи кабеля питания путем подачи затухающего переменного напряжения необходимо рассмотреть ряд параметров, связанных с испытательной цепью, процедурой испытания, сбором и анализом данных. Знание этих параметров важно для определения условий испытаний и обеспечения надлежащей оценки данных испытания, полученных для конкретного испытываемого объекта.

- *Параметры испытательной цепи:* на основании типа испытательной цепи DAC общая испытательная цепь может быть описана несколькими параметрами. В приложении С приведены параметры, определяющие конкретную конфигурацию испытательной цепи.
- *Параметры напряжения:* на основании типа испытательной цепи в приложении С описан тип и номинальное напряжение испытываемого объекта, применимые процедуры испытаний и основные параметры, которые могут использоваться для описания затухающего переменного напряжения.
- *Параметры испытаний:* выполнение испытания путем подачи затухающего переменного напряжения в соответствии с рекомендованными параметрами испытаний может использоваться для описания процесса испытаний (см. приложение С).
- *Параметры оценки:* выполнение испытания путем подачи затухающего переменного напряжения имеет несколько параметров, которые могут использоваться для оценки результатов испытания. В зависимости от типа испытания (испытание на электрическую прочность, контрольное испытание или диагностическое испытание) эти параметры могут содержать информацию о результатах испытания (приложение С).

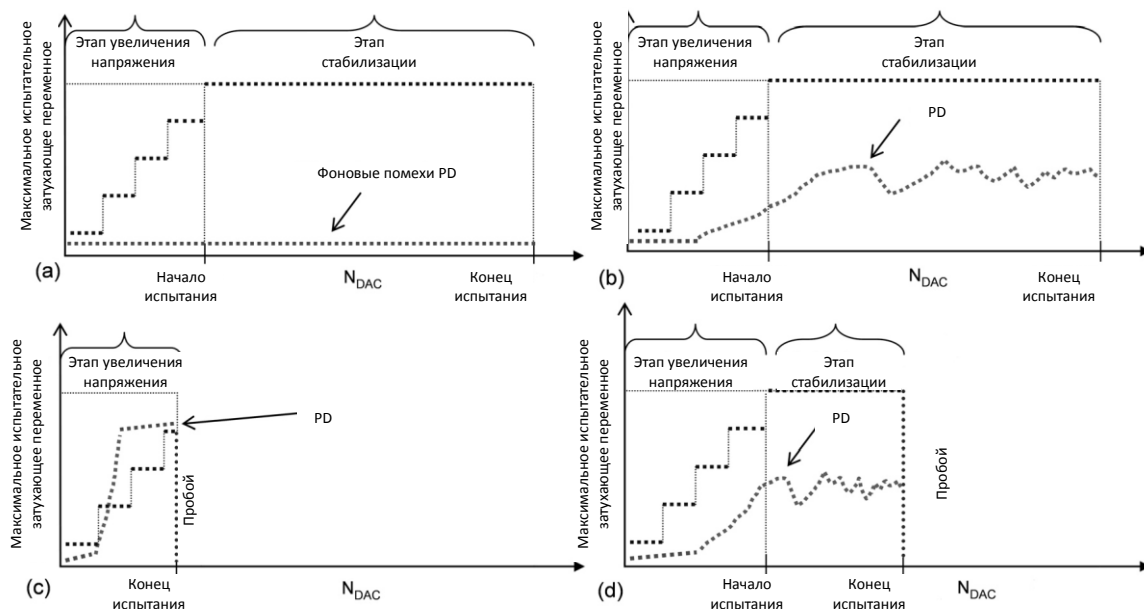


Рис. 6—Схематическое представление четырех различных ситуации при проведении испытаний на электрическую прочность путем подачи затухающего переменного напряжения: (а) в течение выбранного количества воздействий N_{DAC} (пунктирные линии) пробой не произошел; (б) в течение выбранного количества воздействий N_{DAC} (пунктирные линии) пробой не произошел, но обнаружен частичный разряд, превышающий уровень фоновых помех; (с) частичный разряд и пробой произошли до того, как затухающее переменное напряжение достигло уровня испытания на электрическую прочность; (д) частичный разряд и пробой произошли до достижения количества воздействий N_{DAC} испытания на электрическую прочность.

7. Испытание на электрическую прочность путем подачи затухающего переменного напряжения

7.1 Общие сведения

Испытание на электрическую прочность путем подачи затухающего переменного напряжения основано на определенном количестве воздействий затухающим переменным напряжением при выбранном уровне напряжения, которое обычно превышает номинальное напряжение. Испытание путем подачи затухающего переменного напряжения может использоваться для всех типов кабелей и арматуры и основывается на результате в формате «пробой изоляции/отсутствие пробоя изоляции». При проведении неконтролируемого испытания на электрическую прочность никакой информации о влиянии испытания на систему изоляции не получается.



Рис. 7—Схематическое представление процедуры приложения затухающего переменного напряжения, частичный разряд можно обнаружить во время этапов увеличения и стабилизации напряжения (контролируемое испытание на электрическую прочность)

Испытания можно подразделить на два класса:

- *неконтролируемое испытание на электрическую прочность путем подачи затухающего переменного напряжения:* выполняется серия воздействий затухающим переменным напряжением и фиксируется способность удерживать максимальное затухающее переменное напряжение (т.е. пробой не происходит), см. пунктирные линии на рисунках 6а и 6б. Целью испытания на электрическую прочность является создание пробоя при обнаружении опасных дефектов во время приложении напряжения (с минимальным током короткого замыкания), когда влияние отказа мало (без влияния на системы или заказчиков), а ремонтные работы могут быть выполнены с меньшими затратами. Если во время испытания происходит отказ (см. пунктирные линии на рис. 6), то место отказа необходимо определить с использованием процедуры определения места отказа, отремонтировать и провести повторное испытание цепи. Результаты этих испытаний описываются как «пройдено» или «не пройдено». Поскольку это испытание является альтернативой испытанию на электрическую прочность путем непрерывной подачи переменного напряжения, прямой связи с выбранным количеством воздействий затухающим переменным напряжением при выбранном уровне напряжения нет. Таким образом, нельзя исключать, что фиксированное количество воздействий затухающим переменным напряжением при выбранном уровне напряжения может или не может быть достаточным, чтобы дефект вызвал пробой в кабеле;
- *контролируемое испытание на электрическую прочность путем подачи затухающего переменного напряжения:* выполняется серия воздействий затухающим переменным напряжением и измеряется один или несколько дополнительных параметров, которые используются для того, чтобы определить, прошел кабель испытание путем подачи затухающего переменного напряжения или нет (см. черные пунктирные линии, обозначающие затухающее переменное напряжение, и серые пунктирные линии, обозначающие величину частичного разряда, на рис. 6.) Дополнительные параметры характеризуют расширенные диагностические свойства, в т.ч. обнаружение частичного разряда. Стабильность измеряемого свойства во времени также может использоваться для отслеживания влияния испытания на кабельную систему во время приложения напряжения.

Хотя некоторые пользователи выполняют простые неконтролируемые испытания на электрическую прочность (см. исследование в приложении E), рекомендуется проводить контролируемые испытания путем обнаружения и регистрации частичного разряда (см. рис. 5).

Дополнительная информация, получаемая при обнаружении частичного разряда в рамках отслеживания изоляционных свойств и определении влияния испытательного напряжения на диагностические параметры во время испытания на электрическую прочность путем подачи затухающего переменного напряжения, может повысить точность оценки состояния изоляции.

Для всех типов испытаний уровни напряжения и количество воздействий затухающим переменным напряжением должны определяться целью испытания. С точки зрения качества и надежности экранированных кабельных систем для полевых испытаний и оценки результатов важными являются два аспекта:

- параметры испытания путем подачи затухающего переменного напряжения должны быть выбраны таким образом, чтобы предотвратить или свести к минимуму сокращение срока службы вследствие полевых испытаний. В случае испытания на электрическую прочность воздействие на дефектную изоляцию должно быть достаточным, чтобы вызвать пробой или превысить критический уровень контролируемого свойства, но не вызывать деградацию;
- уровень напряжения, количество воздействий затухающим переменным напряжением и продолжительность возбуждений являются важными и неотъемлемыми элементами для производительности кабельной цепи во время и после испытания. Рекомендуемые значения испытательного напряжения и количество возбуждений для испытаний (см. приложения A) основаны на результатах полевых испытаний, полученных разными пользователями. Произвольно увеличивающееся напряжение или превышение количества воздействий по сравнению с рекомендованными значениями может увеличить вероятность раннего отказа в работе.
- Для приемочных испытаний качества новых кабельных систем требуемое выдерживаемое напряжение для стандартных испытаний на заводе считается достаточным.

7.2 Параметры и процедуры испытания путем подачи затухающего переменного напряжения

При испытании путем подачи затухающего переменного напряжения рассматривается пять параметров:

- a) Максимальный уровень испытательного затухающего переменного напряжения V_T [кВ_{пик.}] (см. приложение A)
- b) Количество воздействий затухающим переменным напряжением при выбранных уровнях напряжения испытательного затухающего переменного напряжения во время испытания
- c) Частота затухающего переменного напряжения в герцах
- d) Процент затухания переменного напряжения
- e) Длительность зарядки до уровня затухающего переменного напряжения в секундах

В зависимости от цели испытание путем подачи затухающего переменного напряжения может состоять из двух этапов (рис. 6 и рис. 7):

- Во время этапа увеличения затухающего переменного напряжения напряжение увеличивается до выбранного максимального испытательного напряжения в течение выбранных этапов $t_i V$, например, 0,2 U_0 , с выбранным количеством воздействий DAC, N_{DAC} – увеличение, в соответствии с уровнем напряжения (мин. $N = 5$) ([B14], [B16], [B45], [B58]) см. приложение A.
- Во время этапа стабилизации затухающего переменного напряжения на испытуемый объект подается выбранное испытательное напряжение V_T [кВ_{пик.}] для нескольких циклов воздействия затухающим переменным напряжением N_{DAC} – стабилизация, например, $N = 50$ ([B14], [B16], [B45], [B58]) см. приложение A.

Частота затухающего переменного напряжения определяется индуктором ВН испытательной системы, L_C , и емкостью испытуемого объекта C_{TO} . В большинстве случаев частота затухающего переменного напряжения может быть рассчитана по формуле $f_r = 1/2\pi\sqrt{L_C \cdot C_{TO}}$ в соответствии со стандартом IEC 60060-3.

Коэффициент затухания $DAC (D_f)$ определяется разностью значений напряжений в первом и втором максимумах, деленная на значение напряжения в первом максимуме.

7.3 Критерии оценки затухающего переменного напряжения

При использовании испытания путем подачи затухающего переменного напряжения для проведения приемочных и (или) эксплуатационных испытаний возможны два результата:

- полный монтаж и (или) ремонт были успешно выполнены, а участок кабеля проверен и может использоваться для работы контура
- полный монтаж и (или) ремонт не были выполнены успешно, а участок кабеля необходимо отремонтировать или подвергнуть дальнейшим проверкам

В случае неконтролируемого испытания на электрическую прочность путем подачи затухающего переменного напряжения оценка основывается на двух результатах:

- пройдено, в случае отсутствия пробоя во время испытания,
- не пройдено, в случае пробоя во время испытания.

В случае контролируемого испытания на электрическую прочность путем подачи затухающего переменного напряжения оценка основывается на четырех результатах (см. приложение А).

В случае диагностического испытания оценка основывается на применении правил, основанных на знаниях (если таковые имеются), и ожиданий в отношении управления ресурсами (зачастую ожиданий пользователей).

8. Измерение частичного разряда путем подачи затухающего переменного напряжения

8.1 Общие сведения

Более подробная информация о применении испытания для обнаружения частичного разряда приведена в стандарте IEEE Std 400. Что касается обнаружения частичного разряда с использованием испытания путем подачи затухающего переменного напряжения, основные методы описаны в стандартах IEC 60270, IEC 60885-3 и в публикации Агхориса, [B1], Сигре 2010 [B17], в стандарте IEC 62478 [B42] и в публикации Мейера и соавт. [B64], которые должны быть рассмотрены для обнаружения местных частичных разрядов во внешних кабелях питания под напряжением. В общем случае может быть подключено одно или несколько устройств обнаружения частичного разряда по крайней мере к одной из концевых кабельных заделок и (или) кабельных соединительных муфт. В связи с тем, что испытание путем подачи затухающего переменного напряжения не является непрерывным, но основано на возбуждении напряжения применительно к кабелю питания, необходимо обеспечить правильное срабатывание и синхронизацию между источником затухающего переменного напряжения и устройством обнаружения частичного разряда.

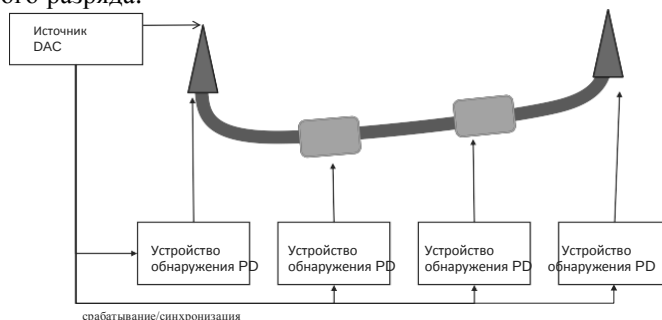


Рис. 8 — Принципы методов автономного обнаружения частичного разряда при подключении к силовому кабелю и его арматуре при выполнении испытаний путем подачи затухающего переменного напряжения

Применяя обнаружение частичного разряда путем подачи затухающего переменного напряжения, снятие заряда с кабеля может быть обнаружено как в изоляции кабеля, так и в кабельной арматуре (см. рис. 8).

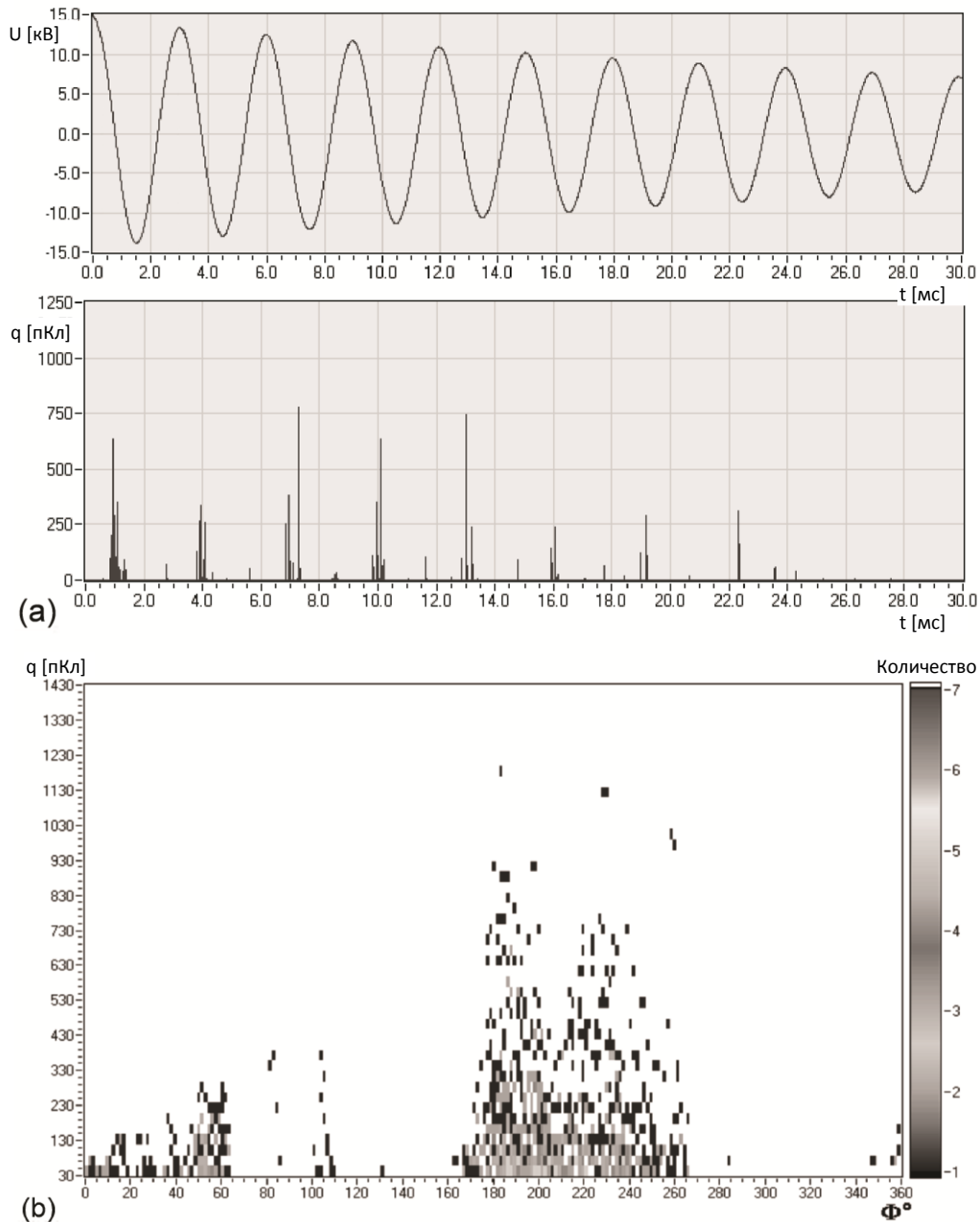


Рис. 9 — Пример моделей частичного разряда при испытательном затухающем переменном напряжении [B86]: (a) 2D-модель частичного разряда q в зависимости от испытательного напряжения U при одинаковой шкале времени и (b) 3D-модель частичного разряда, учитывающая величину разряда, фазовый угол и количество частичных разрядов (серая шкала) до достижения выбранного максимального уровня испытательного напряжения в течение заданного количества воздействий затухающим переменным напряжением.

8.2 Характеристики частичного разряда

Испытание путем подачи затухающего переменного напряжения основано на использовании отдельных воздействий затухающим переменным напряжением. Таким образом, модель частичного разряда, генерируемая в течение одного такого воздействия затухающим переменным напряжением, содержит следующую информацию (см. рис. 9):

- максимальная амплитуда частичного разряда
- модель частичного разряда, зависящая от фазы
- изменения частичного разряда в виде функция зависимости от затухающего напряжения
- напряжение гашения частичного разряда (PDEV)

Поскольку испытание путем подачи затухающего переменного напряжения основано на использовании отдельных воздействий затухающим переменным напряжением, для определения PDIV и PDEV будет использоваться анализ сохраненной и записанной модели частичного разряда (см. рис. 10).

При использовании других параметров частичного разряда, позволяющих обнаружить местные частичные разряды, можно воспользоваться стандартами IEC 60270, IEC 60885-3 и IEEE Std 400.3. Принципы, позволяющие оценить PDIV и PDEV во время испытаний путем подачи затухающего переменного напряжения, рассмотрены на рис. 10 [B86].

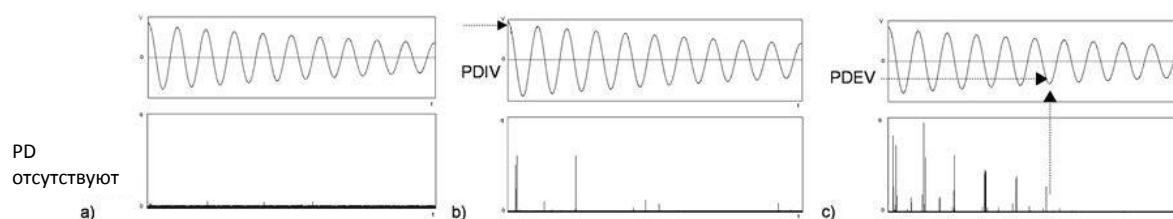


Рис. 10 — Принципы определения напряжений PDIV и PDEV во время испытаний путем подачи затухающего переменного напряжения [B86]. Уровень напряжения PDIV при возбуждении затухающего переменного напряжения соответствует уровню, при котором наблюдается первый частичный разряд

8.3 Критерии оценки частичного разряда

Использование испытаний путем подачи затухающего переменного напряжения для обнаружения частичного разряда позволяет получить модели частичного разряда, которые являются специфическими для затухающего переменного напряжения. Для обнаружения частичного разряда и определения параметров частичного разряда можно руководствоваться указаниями, приведенными в стандарте IEEE Std 400.3 и приложении D.

Более подробная информация об оценке частичного разряда приведена в приложении D.

9. Оценка коэффициента затухания ($\text{tg } \delta$) путем подачи затухающего переменного напряжения

9.1 Общие сведения

Коэффициент затухания для изоляционного материала можно определить с помощью испытаний путем подачи затухающего переменного напряжения, определяя величину ослабления (на основании характеристики затухания, см. приложение B) волны напряжения, поданного на кабель (см. стандарты ASTM D 150-2004, IEC 60141-1 [B37], IEC 60141-3 [B38] и IEEE Std 1425™ [B49]).

Поскольку коэффициент затухания увеличивается в процессе старения кабеля, измерение коэффициента затухания может использоваться для диагностических целей. Емкость кабеля можно также рассчитать с помощью испытания путем подачи затухающего переменного напряжения при заданной частоте испытательного напряжения f_i на основании полученной собственной частоты и известной величины индуктивности катушки без стального сердечника. Оценку коэффициента затухания ($\text{tg } \delta$) можно получить, зная характеристики затухания синусоидального напряжения [B27], [B34], [B74], [B78], [B86].

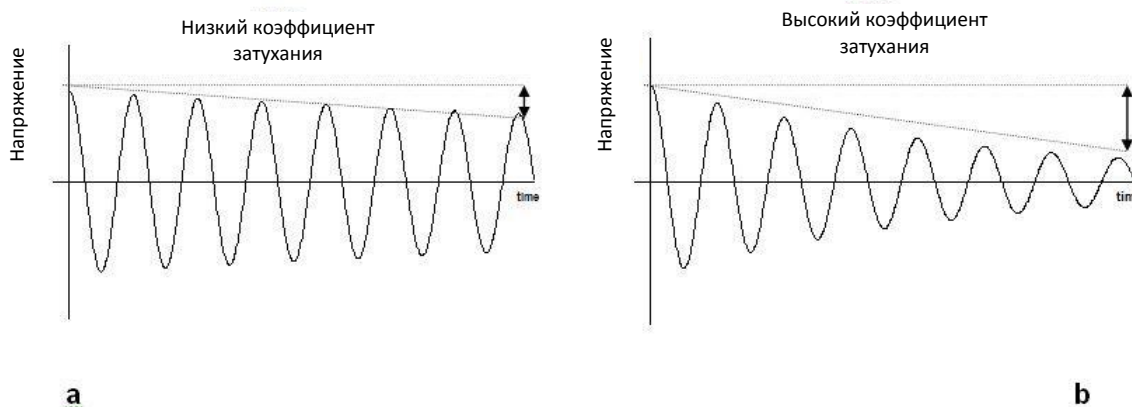


Рис. 11— Оценка коэффициента затухания во время испытания путем подачи затухающего переменного напряжения; схематические примеры колебаний затухающего переменного напряжения, наблюдаемые для кабелей питания с (а) низким и (b) высоким коэффициентом затухания.

Для более точной оценки потерь в кабеле на основании характеристики затухания переменного напряжения должны быть известны потери при испытании и потери в измерительной схеме, т.е. потери в катушке индуктивности без стального сердечника и в переключателе ВН. В качестве испытываемого объекта можно использовать сопротивление, подключенное параллельно емкости. Сопротивление испытываемого объекта можно оценить с помощью формул, представленных в приложении В, что позволит рассчитать коэффициент затухания для нагрузки.

На рис. 11 (а) приведено изображение волны затухающего переменного напряжения для испытываемого объекта с очень низкими диэлектрическими потерями, например, $<0,1\%$ по оценкам для только что смонтированного полимерного кабеля питания. На рис. 11 (b) показана волна затухающего переменного напряжения с высокими диэлектрическими потерями $0,5\%$ (по оценкам для кабеля питания с масляной пропиткой изоляции, состарившегося в процессе эксплуатации). Примеры волн затухающего переменного напряжения при разных $\text{tg } \delta$ приведены в приложении В.

Таблица 1— Примеры дискретных значений коэффициента затухания, соответствующих несостаренному состоянию кабеля с масломполненной (OF) изоляцией. Типичная точность для коэффициента затухания составляет 0,01%.

Испытательное напряжение	Коэффициент затухания, желтая фаза	Коэффициент затухания, красная фаза	Коэффициент затухания, синяя фаза
0,5 U_0	0,15% 15×10^{-4}	0,17% 17×10^{-4}	0,14% 14×10^{-4}
1,0 U_0	0,19% 19×10^{-4}	0,2% 20×10^{-4}	0,17% 17×10^{-4}
1,7 U_0	0,21% 21×10^{-4}	0,22% 22×10^{-4}	0,19% 19×10^{-4}

9.2 Параметры коэффициента затухания

Выполнение измерения коэффициента затухания с использованием образца кабеля дает одно значение коэффициента затухания в процентах, выраженное как $N_{DF} \times 10^{-4}$ (где N_{DF} – номер коэффициента затухания), где соотношение равно $0,1\% = 10 \times 10^{-4}$. По данным публикации Хаутепена и соавт. [B34] измерительное пороговое значение измеримого коэффициента затухания при подаче затухающего переменного напряжения составляет $0,1\%$.

В таблице 1 приведены примеры дискретных значений коэффициента затухания, соответствующие несостаренному состоянию кабеля с маслонаполненной (OF) изоляцией.

9.3 Критерии оценки коэффициента затухания

В большинстве случаев (кроме стандарта IEC 60141-1 [B37], в котором рекомендуется использовать максимально допустимые значения коэффициента затухания для нескольких типов изоляции) определенных правил интерпретации значений коэффициентов затухания нет, поскольку кабельные системы являются сложными и часто содержат множество компонентов. Таким образом, для каждого типа изоляции кабеля должно быть принято решение о том, насколько различаются диэлектрические потери (см. рис. 12-14). Оценка может быть основана на:

- сравнении с ближайшими фазами (A, B, C);
- сравнении с другими кабелями (например, такой же конструкции и с такой же датой выпуска в том же месте);
- значениях для нового кабеля или изменениях, отслеживаемых в ходе периодических проверок или в различных условиях испытаний, например, при различном электрическом напряжении, различных температурах;
- ретроспективных данных.

Определение допустимых значений коэффициента затухания для кабельной системы осложняется тем, что значения зависят не только от качества кабельной системы, но и от применяемых технологий производства кабелей и арматуры. Очевидно, что коэффициент затухания наиболее полезен, если известны конкретные технологии производства кабелей и арматуры, поскольку он используется при выполнении соответствующих сравнений. Поскольку коэффициент затухания по определению зависит от частоты испытательного напряжения, при использовании затухающего переменного напряжения для сравнения коэффициента затухания следует стремиться использовать один и тот же порядок частоты для каждого испытания.

В дополнение к абсолютному значению коэффициента затухания для оценки состояния может использоваться величина приращения коэффициента затухания (Δ коэффициента затухания), измеренная при двух предусмотренных уровнях напряжения, или изменчивость (которая может быть выражена количественно с использованием стандартного отклонения или межквартильного диапазона) значений коэффициента затухания во времени при постоянном уровне напряжения [B27], [B85].

Для повышения эффективности испытания коэффициента затухания при оценке деградации кабеля значения коэффициента затухания должны отслеживаться во времени каждый раз, когда повторяется диагностическое испытание для наблюдения за тенденциями. В общем случае значительное увеличение коэффициента затухания по сравнению с ранее измеренными значениями может указывать на деградацию изоляции [B18], [B57].

Важно понимать, что данные, полученные при подаче различных испытательных затухающих переменных напряжений с разными частотами (от 20 Гц до 500 Гц), можно сравнивать. Как показано в публикации Хаутепена и соавт. [B34], оценки коэффициента затухания процедуры калибровки системы DAC выполняются при различных частотах затухающего переменного напряжения и при разных уровнях испытательного затухающего переменного напряжения. В диапазонах, в которых выполняется калибровка системы DAC, значения можно сравнивать и можно считать подобными. В результате этого для сравнения можно использовать предельные значения коэффициента затухания, которые считаются приемлемыми по сравнению с обычным постоянным напряжением (AC).

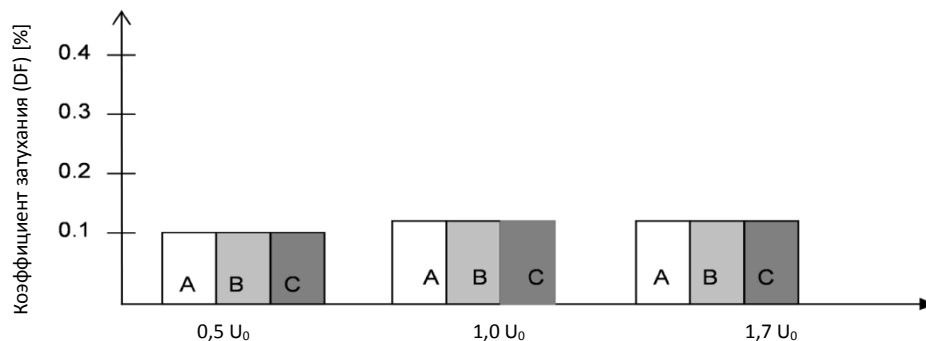


Рис. 12 — Схематическое представление измеренных значений коэффициента затухания при различных уровнях испытательного затухающего переменного напряжения с использованием сравнения с ближайшими фазами (A, B, C). Сравнение случаев показывает, что никакой разницы между отдельными фазами нет. Во всех фазах наблюдаются низкие значения коэффициента затухания и отсутствие значительного увеличения коэффициента затухания в зависимости от испытательного напряжения.

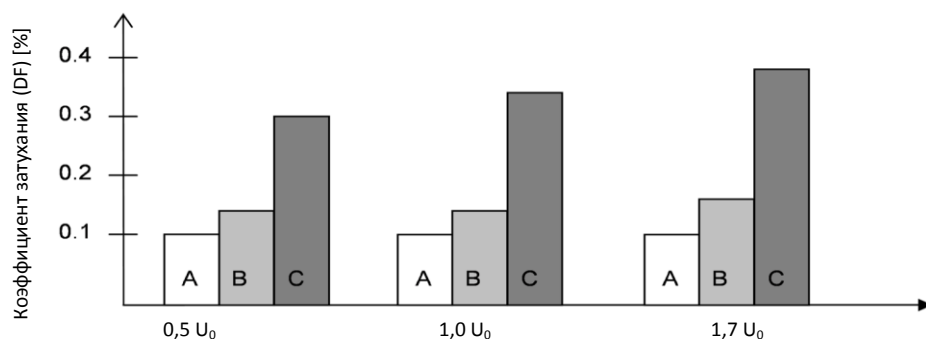


Рис. 13 — Схематическое представление измерений коэффициента затухания при различных уровнях испытательного затухающего переменного напряжения с использованием сравнения с ближайшими фазами (A, B, C). Сравнение случаев показывает, что никакой разницы между отдельными фазами нет, при этом не во всех фазах наблюдаются низкие значения DF.

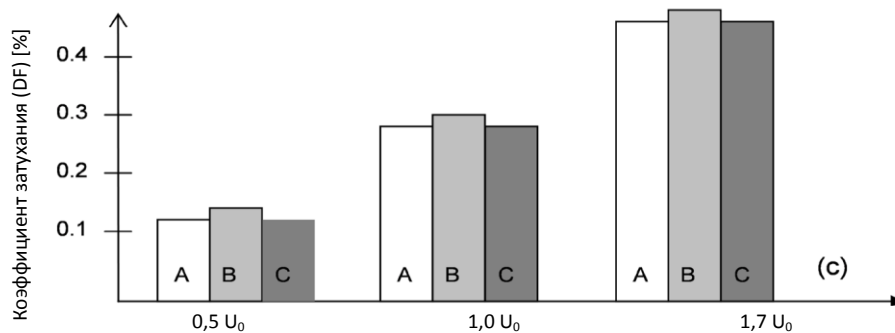


Рис. 14 — Схематическое представление измеренных значений коэффициента затухания при различных уровнях испытательного затухающего переменного напряжения с использованием сравнения с ближайшими фазами (A, B, C). Сравнение случаев показывает, что никакой разницы между отдельными фазами нет. Во всех фазах наблюдаются повышенные значения коэффициента затухания и отсутствие значительного увеличения коэффициента затухания в зависимости от испытательного напряжения.

При хорошем состоянии кабелей значения коэффициента затухания должны незначительно различаться при разных уровнях напряжения (см. рис. 14.) Коэффициент затухания маслбумажной изоляции, который при увеличении напряжения обычно проходит через минимум, более чувствителен к температуре, чем коэффициент затухания экструдированной изоляции. Увеличение коэффициента затухания при повышении напряжения может иметь различные физические причины. Это может указывать на наличие высокой интенсивности частичного разряда или сильных частичных разрядов в кабельных системах с бумажной изоляцией и свинцовой оболочкой (PILC), на наличие водного триинга в кабельных системах с экструдированной диэлектрической изоляцией или других дефектов [B18], [B38], [B44], [B48], [B57], [B77]. Изменение коэффициента затухания со временем при постоянном напряжении также может указывать на водный триинг. Снижение коэффициента затухания может свидетельствовать о проблемах, связанных с наличием влаги в арматуре. Такое изменение коэффициента затухания может быть на порядок меньше, 0,1%. Результаты представляются в виде временной стабильности коэффициента затухания, величины приращения потерь при определенных уровнях электрического напряжения и (или) абсолютного значения коэффициента затухания при определенном напряжении (см. рис. 13 и рис. 14). Эти данные необходимо фиксировать для того, чтобы сделать возможным дальнейший анализ (например, для отслеживания тенденций, сравнения со смежными кабелями и (или) новой интерпретации данных в свете новых знаний).

Новая маслonaполненная (OF) изоляция всегда имеет относительно низкие потери при измерении с использованием промышленных частот. Коэффициент затухания не должен превышать 2×10^{-3} (0,2%). Кроме того, при повышении испытательного напряжения с $0,5 U_0$ до $2,0 U_0$ коэффициент затухания не должен увеличиться более чем на 10×10^{-4} . Когда в результате старения коэффициент затухания превышает 50×10^{-4} (0,5%), возникает вероятность теплового пробоя изоляции. Затухание энергии в изоляции кабеля может быть вызвано различными явлениями, возникающими во время подачи напряжения на изоляцию [B20], [B54].

В связи с указанными процессами старения для маслonaполненной изоляции будут получены более высокие значения коэффициента затухания. Таким образом, для маслonaполненных кабелей коэффициент затухания можно использовать в качестве индикатора деградации, поскольку по мере старения он возрастает. Кроме того, на основании измерений коэффициента затухания можно выполнить оценку производительности кабелей и деградации маслonaполненной изоляции [B10], [B21], [B22], [B37], [B49], [B57], [B58], [B61], [B70], [B77]. Статистическая информация о коэффициенте затухания, собранная в ходе эксплуатационных испытаний, может быть полезной для предоставления практических рекомендаций владельцу кабеля.

10. Выводы

Испытание путем подачи затухающего переменного напряжения представляет собой альтернативный метод испытания и диагностики всех видов кабельных систем распределения и передачи электроэнергии. Затухающее переменное напряжение использует (после зарядки и замыкания испытательного объекта с помощью индуктора) затухающие свободные колебания при собственной частоте от 20 Гц до 500 Гц.

В настоящем руководстве рассматривается использование неконтролируемых (простых) и контролируемых испытаний на электрическую прочность и других диагностических полевых испытаний путем подачи затухающего переменного напряжения для испытания смонтированных экранированных кабельных систем с напряжением от 5 кВ до 230 кВ. Неконтролируемые и контролируемые [тангенс угла потерь (DF), дифференциальный тангенс угла потерь и частичный разряд] испытания на электрическую прочность путем подачи затухающего переменного напряжения используются в качестве диагностических инструментов для оценки состояния кабельных систем.

В приложении А приведены таблицы уровней испытательного напряжения, основанные на основании реальных результатах, для проведения приемочных и эксплуатационных испытаний кабельных систем с напряжением до 230 кВ. При использовании данного метода в последние годы было выяснено, что большинство приемочных испытаний путем подачи затухающего переменного напряжения контролируется за счет обнаружения частичного разряда. Поскольку данный способ применения по-прежнему находится на стадии разработки и проверка эффективности испытания на электрическую прочность путем подачи затухающего переменного напряжения основана на результатах, полученных в последние десять лет, требуется сбор и оценка дополнительных данных, которые должны быть учтены в следующей версии настоящего документа.

В настоящее время обсуждаются преимущества, ограничения и нерешенные вопросы, связанные с испытаниями кабелей и арматуры путем подачи затухающего переменного напряжения. Продолжается разработка методов испытаний путем подачи затухающего переменного напряжения, а также разработка других методов испытаний.

Приложение А (справочное)

Уровни испытательного затухающего переменного напряжения и процедуры испытаний

А.1 Уровни испытательного напряжения

Что касается уровней подаваемого испытательного затухающего переменного напряжения, опыт показывает, что пользователи выбирают испытательные значения таким образом, чтобы они соответствовали международным рекомендациям по проведению испытаний путем подачи переменного напряжения промышленной частоты, содержащимся в стандартах IEC 60502-2, IEC 60840 и IEC 62067, и (или) в соответствии с реальными данными, получаемыми другими пользователями ([B14], [B16], [B19], [B23], [B25], [B28], [B29], [B45], [B57], [B58], [B65], [B66], [B67], [B82], см таблицу А.1 и таблицу А.2). Что касается количества воздействий затухающим переменным напряжением, оно выбирается равным количеству, указанному в публикациях Окорта [B4], Фамети и соавт., 1989 [B15], и Фамети и соавт., 1990 [B16]. Из-за ограниченного опыта использования более высоких значений для кабелей 150 кВ необходима дополнительная проверка [B32].

Таблица А.1— Уровни испытательного затухающего переменного напряжения (от 20 Гц до 500 Гц), используемые для испытаний новых смонтированных силовых кабелей путем подачи затухающего переменного напряжения (50 воздействий затухающим переменным напряжением).

Номинальное напряжение силового кабеля U [кВ] между фазами	U_0 [кВ]	Уровень испытательного затухающего переменного напряжения V_T [кВ _{фаз}], между фазой и землей
3	2	6
5	3	8
6	4	12
8	5	14
10	6	17
15	9	26
20	12	34
25	15	43
30	18	51
35	21	60
45–47	26	74
60–69	35	99
110–115	64	181
132–138	77	187
150–161	87	212
220–230	127	254

Таблица А.2 — Уровни испытательного затухающего переменного напряжения (от 20 Гц до 500 Гц) используемые при эксплуатационных испытаниях (50 воздействий затухающим переменным напряжением) отремонтированных/восстановленных силовых кабелей.

Номинальное напряжение силового кабеля U [кВ] между фазами	U_0 [кВ]	Уровень испытательного затухающего переменного напряжения V_T [кВ _{пик}], между фазой и землей
3	2	5
5	3	6
6	4	10
8	5	11
10	6	14
15	9	21
20	12	28
25	15	35
30	18	41
35	21	48
45–47	26	60
60–69	35	80
110–115	64	145
132–138	77	150
150–161	87	170
220–230	127	204
275–287*	159	237
330–345*	191	282
380–400*	220	293

* Уровни испытательного напряжения выше 230 кВ являются условными и приведены только с целью проведения исследований.

А.2 Приемочные и эксплуатационные испытания

Процедуры испытаний путем подачи затухающего переменного напряжения для приемочных испытаний и эксплуатационных испытаний приведены в следующих документах: IEC 60060-3, [B3], [B4], [B5], [B6], [B9], [B12], [B14], [B15], [B16], [B31], [B45], [B56], [B58], [B59], [B60], [B69], [B70], [B71], [B72], [B78], [B79] и [B87].

- Этап 1. В зависимости от класса напряжения кабеля выбрать подходящий максимальный уровень испытательного затухающего переменного напряжения V_T (пиковое значение в киловольтах), см. таблицу А.1 и таблицу А.2.
- Этап 2. Для этапа увеличения затухающего переменного напряжения зафиксировать скачки напряжения ΔV_T (пиковое значение в киловольтах) или в виде U_0 , например, $0,2 U_0$.
- Этап 3. Зафиксировать количество воздействий N_{DAC} , применяемых в ходе этапа повышения затухающего переменного напряжения N_{DAC} , например, по пять на каждый скачок испытательного напряжения ΔV_T .
- Этап 4. Установить количество возбуждений N_{DAC} , применяемых в ходе этапа стабилизации затухающего переменного напряжения, например, 50. При этом для эксплуатационных испытаний старых кабельных систем сократить количество воздействий затухающим переменным напряжением до минимального значения, необходимого для получения полезного диагностического результата; это может позволить избежать возможного возникновения электрических триггеров. Для предотвращения зарождающихся отказов могут предприняты соответствующих мер.
- Этап 5. В соответствии с параметрами, выбранными на этапах 1-3, начать процедуру испытания этапа повышения затухающего переменного напряжения (см также рис. 7).
- Этап 6. Для испытания, контролируемого на основании частичного разряда, оценить PDIV. В случае возникновения частичных разрядов, оценить вредоносность источника частичного разряда, например, внешнего или внутреннего, и принять соответствующие меры.

- Этап 7. При достижении максимального уровня испытательного затухающего переменного напряжения V_T начать испытание на электрическую прочность путем подачи затухающего переменного напряжения в соответствии с параметрами этапа 1 и этапа 4.
- Этап 8. Для испытания, контролируемого на основании измерения частичного разряда, оценить наличие частичного разряда. При возникновении частичных разрядов оценить вредоносность источника частичного разряда, например, внешнего или внутреннего, и принять соответствующие меры.
- Этап 9. Оценить результаты испытания в соответствии с рисунком A.1 и пунктом 7.3.

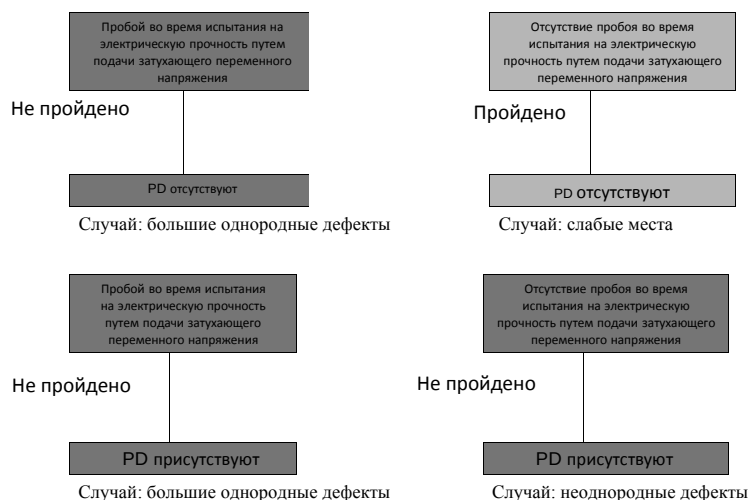


Рис. A.1 — Схематическое представление критериев оценки для испытания на электрическую прочность силовых кабелей среднего и высокого напряжения путем подачи затухающего переменного напряжения, контролируемого путем измерения частичного разряда. В случаях, когда в цепях новых или эксплуатируемых силовых кабелей не должно быть частичного разряда, даже если не наблюдалось пробоя, конкретный кабель должен быть отбракован из-за присутствия частичного разряда.

A.3 Диагностическое испытание

Процедура испытания путем подачи затухающего переменного напряжения для диагностического испытания состоит в следующем:

- Этап 1. В зависимости от класса напряжения кабеля выбрать подходящий максимальный уровень испытательного затухающего переменного напряжения V_T (пиковое значение в киловольтах), см. таблицу A.2. В соответствии с ретроспективными результатами проведения технического обслуживания и эксплуатации снизить максимальный уровень испытательного напряжения до уровня, при котором не ожидается никакого влияния прошедшего срока службы.
- Этап 2. Для этапа увеличения затухающего переменного напряжения зафиксировать скачки напряжения ΔV_T (пиковое значение в киловольтах) или в виде U_0 , например, $0,2 U_0$.
- Этап 3. Зафиксировать количество воздействий N_{DAC} , применяемых в ходе этапа повышения затухающего переменного напряжения N_{DAC} , например, по пять на каждый скачок испытательного напряжения ΔV_T .
- Этап 4. В соответствии с параметрами, выбранными на этапах 1-3, начать процедуру испытания этапа повышения затухающего переменного напряжения (см также рис. 7).
- Этап 5. Для испытания, контролируемого на основании частичного разряда, оценить PDIV. В случае возникновения частичных разрядов, оценить вредоносность источника частичного разряда, например, внешнего или внутреннего, и принять соответствующие меры.

- Этап 6. Для испытания, контролируемого на основании частичного разряда, оценить PDIV. В случае возникновения частичных разрядов, оценить вредоносность источника частичного разряда, например, внешнего или внутреннего, и принять соответствующие меры.
- Этап 7. Оценить результаты испытания в соответствии с пунктом 7.3, пунктом 8 и пунктом 9.

Приложение В (справочное)

Оценка коэффициента затухания для затухающего переменного напряжения

Коэффициент затухания (параметр $\text{tg} \delta$), является важным диагностическим параметром оценки состояния бумажно-масляной изоляции [B10], [B18], [B20], [B22], [B27], [B37], [B38], [B44], [B48], [B49], [B57], [B61], [B77], [B85]. Наиболее важные и заметные причины [B54]:

- потери в токопроводящем материале, вызванные конечным объемным сопротивлением изоляции и токов утечки
- трение между диполями и изоляционным материалом (поляризационные потери)
- усиление локального поля на границах между материалами с разной проницаемостью
- наличие активности частичного разряда также может увеличить значение коэффициента затухания.

Для исправной бумажно-масляной изоляции при промышленных частотах в десятки герц коэффициента затухания характеризуются низкими значениями, например, ниже 20×10^{-4} (0,2%), и меньшей зависимостью от электрических напряжений, например, менее 0,1% при увеличении испытательного напряжения, к примеру, с $0,5U_0$ до $2,0U_0$. Теоретически значения, превышающие 0,5% коэффициента затухания при номинальном напряжении, в сочетании с эффектом старения и временной и локальной тепловой перегрузкой могут представлять более высокий риск теплового пробоя.

Увеличение электрического напряжения выше уровня PDIV сопровождается активностью частичного разряда высокой интенсивности, например, уровни частичного разряда в диапазоне нанокулонов [нКл] также могут увеличить диэлектрические потери.

На рис. В.1 показана модель цепи для системы DAC, фактически, последовательная резистивно-индуктивно-емкостная цепь.

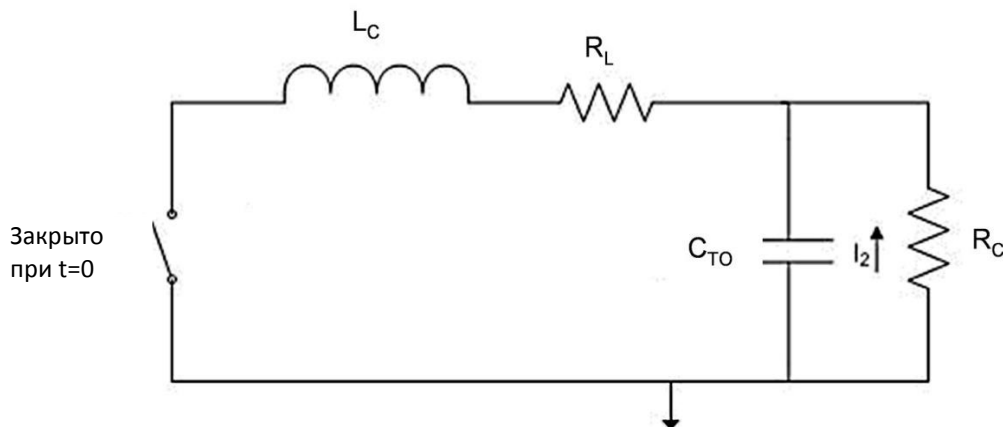


Рис. В.1—Модель цепи DAC, которая может использоваться для оценки коэффициента затухания.

R_L — это полное внутреннее сопротивление системы, которое изменяется с амплитудой и частотой приложенного напряжения, R_C — это потери в испытуемом объекте, L_C — это индуктивность катушки без стального сердечника, а C_{TO} — это емкость испытуемого объекта. Следует отметить, что C_{TO} и R_C также могут быть функцией от напряжения и частоты.

На основании полученного колебательного напряжения в испытательной установке путем подачи затухающего переменного напряжения, коэффициента затухания может быть измерен с использованием характеристик затухания волны затухающего переменного напряжения, как показано в публикациях Хаутепена и соавт. [B34] и Вестера и соавт., 2007 [B87] (см. рис. В.2).

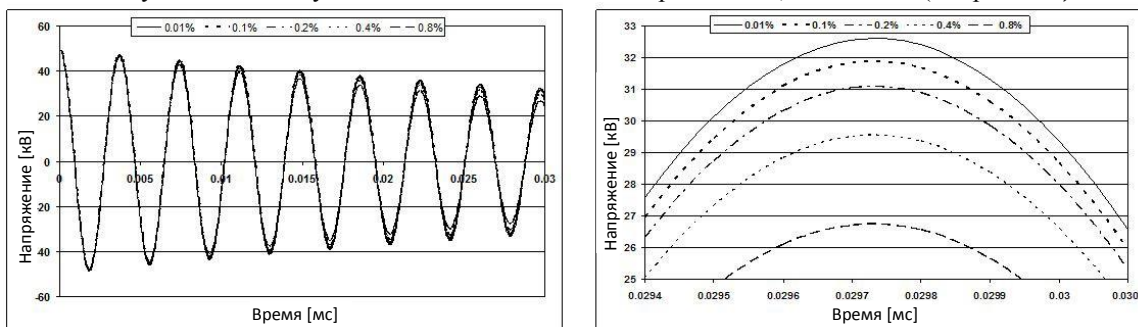


Рис. В.2— Форма волны затухающего переменного напряжения для испытательной установки DAC с $L = 2$ Гн и $C = 1$ мкФ для различных факторов диэлектрических потерь. Справа увеличенное изображение восьмого цикла DAC, более подробно демонстрирующее различия в затухании.

Волна затухающего переменного напряжения может быть описана следующим образом

$$U(t) = U_0 \cdot e^{-\beta \cdot t} \sin(\omega \cdot t + \varphi)$$

где U_0 - это напряжение в конечный момент времени зарядки однополярного напряжения, β - это коэффициент ослабления, φ - это фазовый сдвиг, а $\omega = 2\pi f$. $\tan \delta$ можно рассчитать на основании характеристик затухания волны.

Для того чтобы иметь возможность оценить коэффициент затухания испытуемого объекта, необходимо узнать потери испытательной установки путем подачи затухающего переменного напряжения, например, путем определения потерь как сопротивление R_L во всей цепи испытания путем подачи затухающего переменного напряжения без потерь испытуемого объекта. Потери испытуемого объекта можно представить параллельным сопротивлением R_C . Это сопротивление R_C можно оценить численно на основании результатов измерений с использованием формулы, приведенной в публикациях Хаутепена и соавт. [B34] и Вестера и соавт., 2007 [B87]:

$$R_C = \frac{L_C}{2\beta \cdot \frac{L}{C_{DAC}} - R_{C_{TO}}}$$

Неизвестный коэффициент β_{DAC} можно вычислить непосредственно на основании характеристик затухания затухающего переменного напряжения, используя напряжение и время пиков напряжения различных периодов. Например:

$$\frac{U_5}{U_1} = e^{-\beta(t_5 - t_1)} \Rightarrow \beta_{DAC} = -\frac{\ln(U_5/U_1)}{(t_5 - t_1)}$$

Коэффициент затухания равен значению DL образца кабеля, заданному по следующей формуле:

$$DL = \frac{1}{\omega \cdot R_C \cdot C_{TO}}$$

Приложение С

(справочное)

Параметры затухающего переменного напряжения

С.1 Параметры испытательной цепи

С.1.1 Емкость испытуемого объекта C_{TO} в микрофарадах

В зависимости от типа, длины и размеров кабеля эта величина может варьироваться от нескольких нанофард до нескольких микрофард. Если испытуемый объект имеет относительно малую емкость в несколько нанофард, общая емкость испытуемого объекта может быть подключена параллельно испытуемому объекту с дополнительной емкостью ВН. В этом случае важно, чтобы эта емкость могла выдерживать максимальное испытательное напряжение, а при проведении контролируемых испытаний, например, при измерении частичного разряда или диэлектрических потерь, в нем не должно быть частичного разряда и должны быть известны его диэлектрические потери, зависящие от напряжения. В случае измерения частичного разряда необходимо последовательно подключить блокирующую катушку с дополнительной емкостью, чтобы избежать прохождения сигналов частичного разряда через дополнительную емкость вместо измерительной системы.

С.1.2 Индуктивность системы L_C в генри

Помимо емкости испытуемого объекта, это вторая основная часть системы DAC, и в зависимости от типа системы DAC индуктивность (одна или несколько катушек) системы DAC может быть фиксированной, например, 8 Гн, или она может быть переменной в зависимости от испытательных напряжений и емкости испытуемого объекта.

С.1.3 Максимальное испытательное напряжение $V_{\max}$ (пиковое значение в киловольтах)

Это максимальное испытательное напряжение первого цикла напряжения DAC (V_T), равное предварительно выбранному максимальному испытательному напряжению, поскольку оно может быть сгенерировано конкретной системой DAC для целей испытания; при этом также определяются элементы испытательной цепи и испытуемый объект, подлежащие испытаниям.

С.1.4 Максимальный ток зарядки $I_{C_{\max}}$ в миллиамперах

Стандартный параметр системы DAC, который в зависимости от типа системы может варьироваться в диапазоне от нескольких миллиампер до нескольких десятков миллиампер. Следует считать, что в сочетании с C_{TO} и с $V_{\max}$ данный параметр определяет длительность зарядки до уровня затухающего переменного напряжения.

С.1.5 Максимальный ток цепи переключения $I_{S_{\max}}$ в амперах

Стандартный параметр системы DAC, который в зависимости от типа системы может варьироваться от нескольких ампер до нескольких сотен ампер. Следует считать, что в сочетании с C_{TO} и с $V_{\max}$ данный параметр определяет максимальную емкость испытуемого объекта.

С.1.6 Длительность переключения t_s в микросекундах

Время, которое необходимо системе DAC после достижения максимального испытательного напряжения V_T после зарядки, чтобы замкнуть колебательный контур L_C и C_{TO} и начать затухающие колебания между L_C и C_{TO} . Длительность может варьироваться в диапазоне нескольких микросекунд.

С.1.7 Коэффициент качества Q_C

Коэффициент качества Q_C колебательного контура равен

$$Q_C = \left(L_C / (C_{TO} \cdot R_A^2) \right)$$

где

R_A — эквивалентное сопротивление цепи.

С.1.8 Максимальная емкость кабеля $C_{TO\max}$

Максимальную емкость кабеля $C_{TO\max}$, которая может быть проверена с помощью испытательной установки путем подачи затухающего переменного напряжения, можно рассчитать по формуле

$$C_{TO} = \left(I_{s\max} / V_{\max} \right)^2 \cdot L_C$$

где

$V_{\max}$ — максимальное приложенное испытательное напряжение

$I_{s\max}$ — допустимый переменный ток в колебательном контуре и минимальная одобренная собственная частота цепи f_r .

С.2 Параметры напряжения**С.2.1 Возбуждение затухающего переменного напряжения**

Возбуждение затухающего переменного напряжения завершает процесс зарядки емкости испытуемого объекта C_{TO} током $I_{C\max}$ до выбранного уровня испытательного напряжения V_{DAC} с последующим затухающим синусоидальным колебанием при собственной частоте цепи f_r и заданном коэффициенте затухания D_f . Продолжительность возбуждения затухающего переменного напряжения состоит из двух этапов: этап зарядки (в диапазоне нескольких десятков секунд) и этап колебаний затухающего переменного напряжения (в диапазоне сотен миллисекунд) (см. рис. 2).

С.2.2 Затухающее переменное напряжение

Начиная с (отрицательного или положительного) уровня напряжения возбуждения и при затухающих синусоидальных колебаниях в области нулевого уровня, затухающее переменное напряжение характеризуется пиковым значением V_{DAC} , собственной частотой цепи f_r и коэффициентом затухания.

С.2.3 Собственная частота цепи f_r в герцах

Собственная частота цепи f_r равна величине, обратной промежутку времени между прохождением двух последовательных максимумов, которая зависит от C_{TO} и L_C и в большинстве случаев рассчитывается по формуле:

$$f_r = \left(1 / 2\pi \sqrt{L_C \cdot C_{TO}} \right)$$

Требования (допустимые значения): например, собственная частота: $f_r =$ от 20 Гц 500 Гц.

С.2.4 Процентное значение коэффициента затухания

Процентное значение коэффициента затухания – разность значений напряжений в первом и втором максимумах, деленная на значение напряжения в первом максимуме. Для того чтобы сгенерировать реалистичное возбуждение затухающего переменного напряжения коэффициент D_f , как правило, должен быть меньше 15%. Требования (допустимые значения): например, коэффициент затухания $D_f \leq 15\%$.

С.2.4.1 Уровень напряжения V_{DAC} (пиковое значение, в киловольтах)

Уровень напряжения V_{DAC} (пиковое значение, в киловольтах) – фактический уровень испытательного затухающего переменного напряжения, равный фактическому выбранному уровню напряжения V_T , поскольку оно должно быть сгенерировано системой DAC. Требования (допустимые значения): например, значение напряжения $V_{DAC} = V_{peak} (1 \pm 0,03)$

С.2.5 Длительность зарядки t_c в секундах

Длительность зарядки t_c в секундах равно времени, необходимому при заданном, например, максимальном токе $I_{C \max}$, чтобы зарядить емкость испытуемого объекта C_{TO} до выбранного уровня испытательного напряжения V_{DAC} . Требования (допустимые значения): например, длительность зарядки $t_c < 100$ с.

С.3 Параметры испытаний

С.3.1 Уровень испытательного напряжения V_T в киловольтах пикового напряжения

Уровень испытательного напряжения V_T – это максимальное значение напряжения в течение всего DAC возбуждения (см. рис. 2). Для целей испытания это значение должно быть выбрано в соответствии с рекомендациями по проведению испытаний. В зависимости от процедуры испытания V_T может быть выбрано на одном испытательном уровне или даже на нескольких.

С.3.2 Скачки испытательного напряжения ΔV

Необходимо определить скачки испытательного напряжения ΔV в увеличении напряжения V_T , обеспечивающие возбуждения затухающего переменного напряжения для испытания с увеличением напряжения. ΔV_T может быть определен в киловольтах пикового напряжения или в единице измерения U_0 , например, $0,1 U_0$ или $0,2 U_0$.

С.3.3 Количество возбуждений N_{DAC}

Количество воздействий затухающим переменным напряжением, которые будут сгенерированы при заданном уровне испытательного напряжения V_T . Общая процедура испытания может состоять из различных последовательностей N_{DAC} , например, во время испытания напряжением на электрическую прочность нового кабеля $N_{DAC} = 50$ возбуждений [B16], [B45], или во время диагностического испытания, при котором N_{DAC} может быть меньше.

С.3.4 Продолжительность испытания в минутах

Продолжительность испытания в минутах – общее время, за которое выбранное количество последовательных возбуждений затухающего переменного напряжения N_{DAC} было подано на испытуемый объект при заданном уровне испытательного напряжения V_T .

С.3.5 Испытание на электрическую прочность путем подачи затухающего переменного напряжения

Испытание на электрическую прочность путем подачи затухающего переменного напряжения представляет собой серию возбуждений затухающего переменного напряжения, подаваемых последовательно на испытываемый кабель питания. Продолжительность испытания определяется количеством воздействий DAC, примененных к испытываемому кабелю питания при выбранном испытательном затухающем переменном напряжении. Максимальный выдерживаемый уровень затухающего переменного напряжения определяется пиковыми значениями напряжения V_{DAC} , соответственно среднеквадратическими значениями $V_{DAC}/\sqrt{2}$ первого цикла DAC.

С.4 Параметры оценки:

С.4.1 Результат испытания на электрическую прочность путем подачи затухающего переменного напряжения

После выполнения нескольких возбуждений затухающего переменного напряжения при выбранном уровне напряжения результат может быть описано либо как «Пройдено», при отсутствии пробоев, либо как «Не пройдено» в случае пробоя.

С.4.2 PDIV (пиковое значение, в киловольтах)

PDIV (пиковое значение, в киловольтах) –уровень испытательного напряжения V_T , при котором были обнаружены повторяющиеся частичные разряды.

С.4.3 PDEV (пиковое значение, в киловольтах)

PDEV (пиковое значение, в киловольтах) –уровень испытательного напряжения V_T , при котором повторяющиеся частичные разряды были погашены.

С.4.4 Уровень частичного разряда в пикокулонах

Уровень частичного разряда в пикокулонах – уровень частичного разряда, наблюдаемый после подачи напряжения. Он представляет собой наиболее часто встречающуюся величину частичного разряда.

С.4.5 Отображение расположения частичного разряда

Отображение расположения частичного разряда – графическое и (или) числовое представление концентрации импульсов (интенсивности) частичного разряда в зависимости от длины кабеля. Если это применимо, может быть указано расположение арматуры кабелей (соединительных муфт, концевых заделок). Отображение расположения частичного разряда также может оцениваться для различных уровней испытательного напряжения V_T .

С.4.6 Изменение уровня частичного разряда в зависимости от напряжения

Выполнение нескольких возбуждений затухающего переменного напряжения при одних и тех же или разных уровнях напряжения может предоставлять информацию о поведении частичного разряда в зависимости от этих параметров. Оценка такого поведения может быть полезной для определения типа дефекта (дефектов).

С.4.7 Разрешенная по фазе модель частичного разряда

Выполнение одного или нескольких циклов возбуждений затухающего переменного напряжения обеспечивает графическое представление, отображающее амплитуды и интенсивность импульсов частичного разряда в зависимости от цикла испытательного напряжения. Оценка такого поведения может быть полезной для определения типа дефекта (дефектов).

С.4.8 Процентное значение параметра коэффициента затухания

Процентное значение параметра коэффициента затухания – параметр диэлектрических потерь, наблюдаемых при определенном уровне напряжения возбуждения. Данный параметр представляет собой потери энергии в испытуемом объекте при заданном испытательном напряжении.

С.4.9 Изменение параметра диэлектрических потерь в зависимости от времени и уровня напряжения

Выполнение нескольких возбуждений DAC при одних и тех же или разных уровнях напряжения может предоставлять информацию о поведении диэлектрических потерь в зависимости от этих параметров. Оценка такого поведения может быть полезной для оценки деградации пропитанной маслом изоляции.

С.4.10 Чувствительность частичного разряда

Чувствительность частичного разряда – это самый слабый калибровочный сигнал, который может быть обнаружен, при этом самый слабый калибровочный сигнал, который может быть локализован.

Приложение D (справочное)

Пример оценки частичного разряда для испытаний после прокладки кабеля и эксплуатационных испытаний

При установлении требуемой чувствительности и максимального допустимого уровня фонового шума для измерения частичного разряда на месте эксплуатации необходимо учесть указанные ниже аспекты. Более подробная информация приведена в стандарте IEEE Std 400.3.

- a) *Тип кабельной системы (т.е. тип кабеля и тип арматуры):* полимерные кабельные системы, как правило, весьма чувствительны к частичному разряду, в то время как заполненные жидкостью системы, а также системы с вязкой пропиткой обычно менее чувствительны к частичному разряду. Что касается арматуры, заполненной жидкостью, арматура, как правило, выдерживает более высокую активность частичного разряда, чем арматура без жидкости, и в течение более длительного времени до возникновения отказа.
- b) *Уровень рабочего электрического напряжения кабельной системы:* у твердых диэлектриков степень активности частичного разряда быстро возрастает с увеличением рабочего напряжения. Как следствие, кабельные системы ВН и особенно кабельные системы СВН, которые предназначены для работы при относительно высоких электрических полях, являются, как правило, гораздо более чувствительны к частичному разряду, чем системы СН, которые работают при более низком электрическом напряжении.
- c) *Уровень испытательного напряжения, достигаемый во время испытаний:* при испытаниях кабельных систем при напряжениях выше номинального напряжения фактическое электрическое напряжение в системе превышает номинальное напряжение. Следовательно, мощность частичного разряда, которые могут быть обнаружены, возрастает вместе с испытательным напряжением.
- d) *Активность и помехи частичного разряда:* активность и помехи частичного разряда, которые могут возникать за пределами испытываемого объекта, также возрастают вместе с испытательным (пере)напряжением; например, коронные разряды, возникающие в высоковольтном соединении между источником напряжения и испытываемым объектом.

Для примера, сильные дефекты маслонаполненных кабелей СН (PILC) или дефекты арматуры маслонаполненных кабелей XLPE СН могут вызвать частичного разряда в диапазоне сотен пикокулонов, не приводя к немедленному отказу. Поэтому для таких ситуаций уровень фонового шума порядка 100 пКл может быть принят для испытания частичного разряда на месте эксплуатации. С другой стороны, для кабельных систем (С)ВН с изоляцией из экструдированного полимера частичного разряда в несколько десятков пикокулонов может привести к отказу уже в течение относительно короткого периода времени. Следовательно, в этом случае очень важно поддерживать уровень фонового шума на месте эксплуатации как можно более низким.

Эти два примера также показывают сложность установления общих пороговых значений для уровней частичного разряда во время измерений параметров кабельных систем на месте эксплуатации. Используемые в настоящее время пороговые значения основаны на опыте, долгосрочных наблюдениях за измеренными кабельными системами и последующих лабораторных исследованиях изученных частей кабельной системы, например, соединительных муфт.

В дополнение к кажущемуся заряду для оценки степени тяжести частичного разряда может быть очень полезной оценка разрешенных по фазе моделей частичного разряда, а также формы отдельных импульсов частичного разряда. В частности, важно различать активность внутренних частичного разряда (т.е. частичного разряда, возникшие внутри испытываемого объекта) и активность внешних частичного разряда или помехи (т.е. частичного разряда, возникшие за пределами испытываемого объекта).

Для того чтобы оценить критичность частичного разряда, идентификация типа отказа должна быть дополнена локализацией места частичного разряда [B24], [B57]. В случаях расширенной геометрии, например, при длинных кабелях, идентификация частичного разряда без локализации была бы бесполезной. Наиболее часто используемый метод расчета местоположения частичного разряда основан на рефлектометрии с временным разрешением. Время поступления исходных и отраженных сигналов частичного разряда измеряется с помощью одного или нескольких датчиков для вычисления исходной точки на основании разности времени поступления электрических

сигналов.

Другой метод, анализ снижения сигнала, основан на том факте, что импульсы частичного разряда распространяются через кабель питания в различных режимах [B57]. В зависимости от частоты распространяющегося сигнала амплитуда будет более или менее ослабленной. При частотах до нескольких мегагерц сигналы частичного разряда лишь немного ослабляются, тогда как при более высоких частотах затухание выше. Этот эффект может использоваться для грубой оценки источника сигналов частичного разряда.

Для определения состояния изоляции важными считаются несколько параметров частичного разряда, которые могут использоваться для оценки измерения частичного разряда. Для полевого применения диагностики частичного разряда показанные ниже свойства частичного разряда оказались значимыми для практического опыта. Свойства измеряют непосредственно детектирующими устройствами кабельной системы или получают после анализа данных измерений для отдельных кабельных компонентов на основании отображения расположения частичного разряда. На рисунках D.1-D.3 приведены блок-схемы принятия решений для испытаний после укладки новых смонтированных сегментов кабеля из сшитого полиэтилена. Конечный результат измерения частичного разряда должен быть представлен в форме отчета об измерениях частичного разряда. На основании этого отчета может быть выполнена оценка состояния кабельной системы. Отчет об измерениях частичного разряда должен описывать реальное состояние кабельной системы, так чтобы владелец мог использовать этот отчет в качестве входных данных для принятия решений, касающихся технического обслуживания.

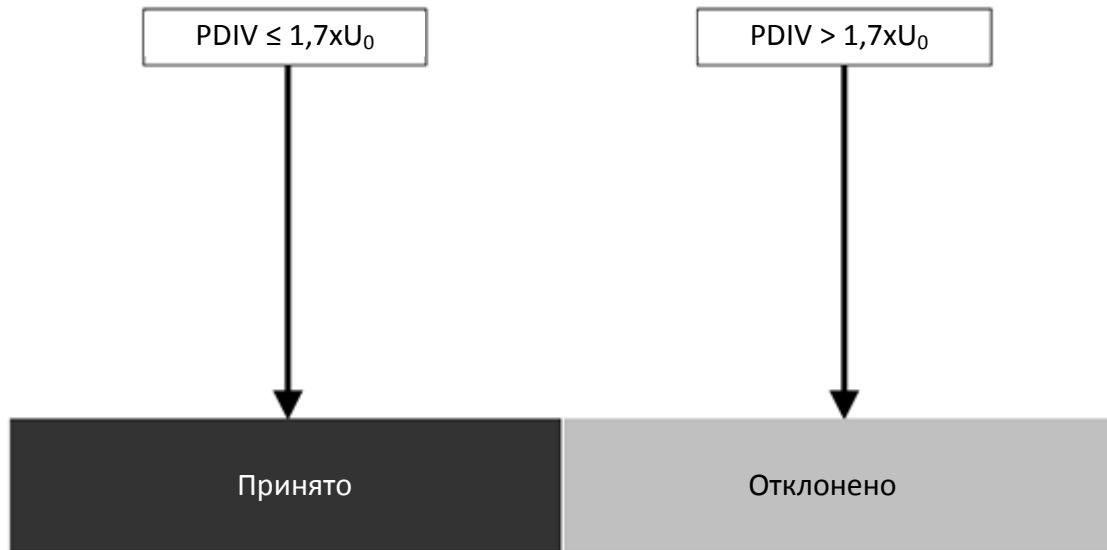


Рис. D.1— Пример блок-схемы принятия решения для обнаружения частичного разряда при испытании путем подачи затухающего переменного напряжения после укладки кабеля (XPLE)

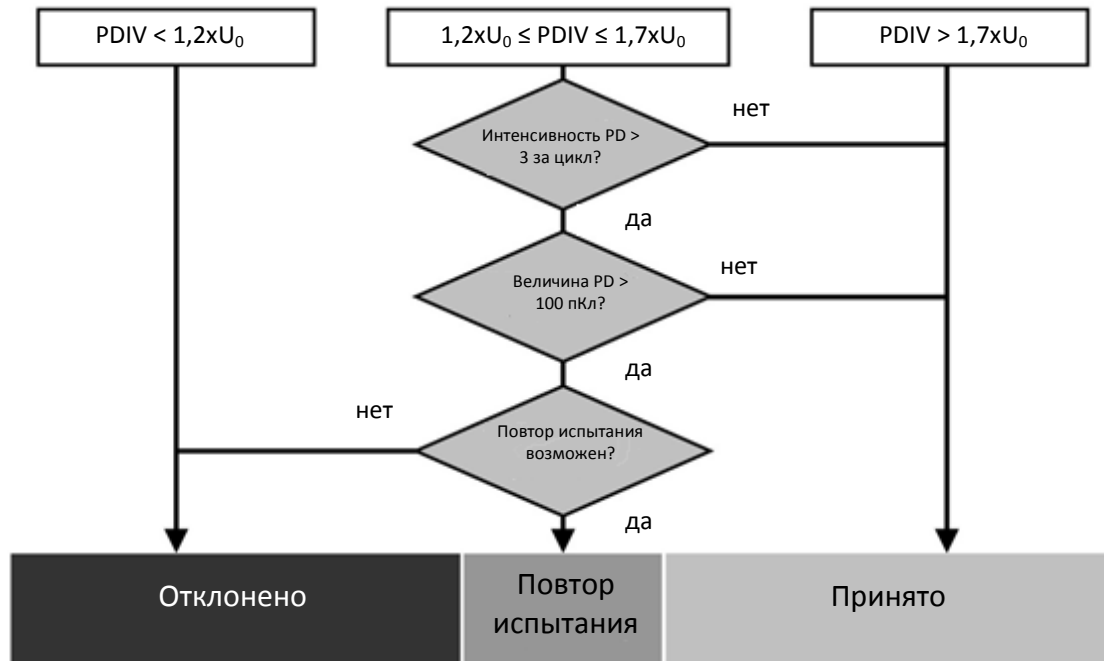


Рис. D.2— Пример блок-схемы принятия решения для обнаружения частичного разряда при испытании путем подачи затухающего переменного напряжения после установки кабельной соединительной муфты.

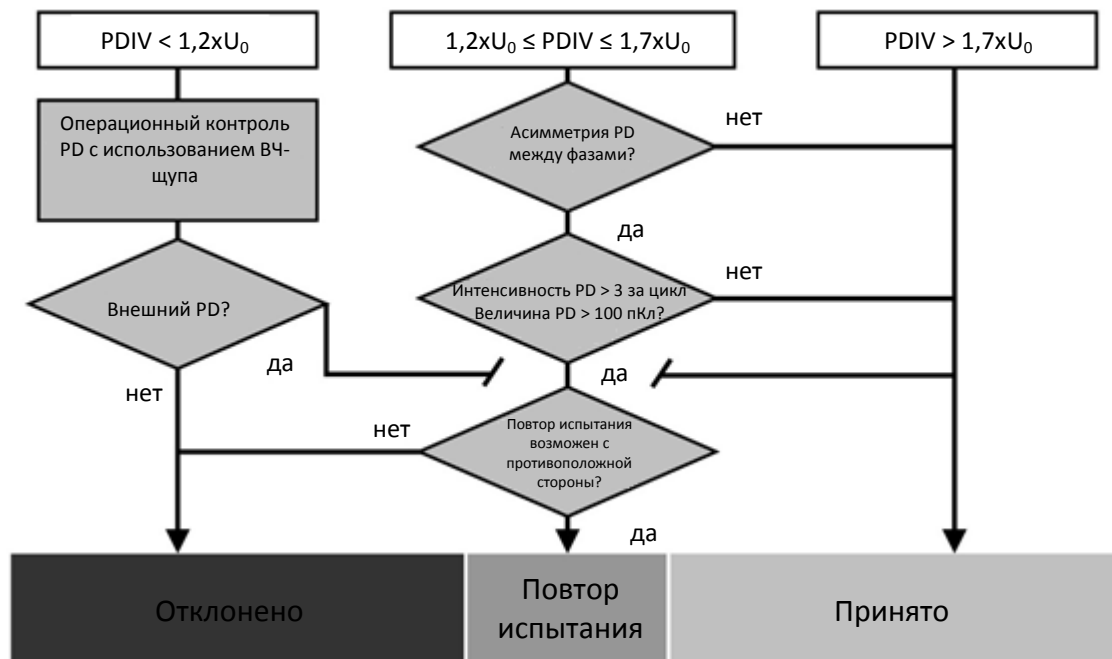
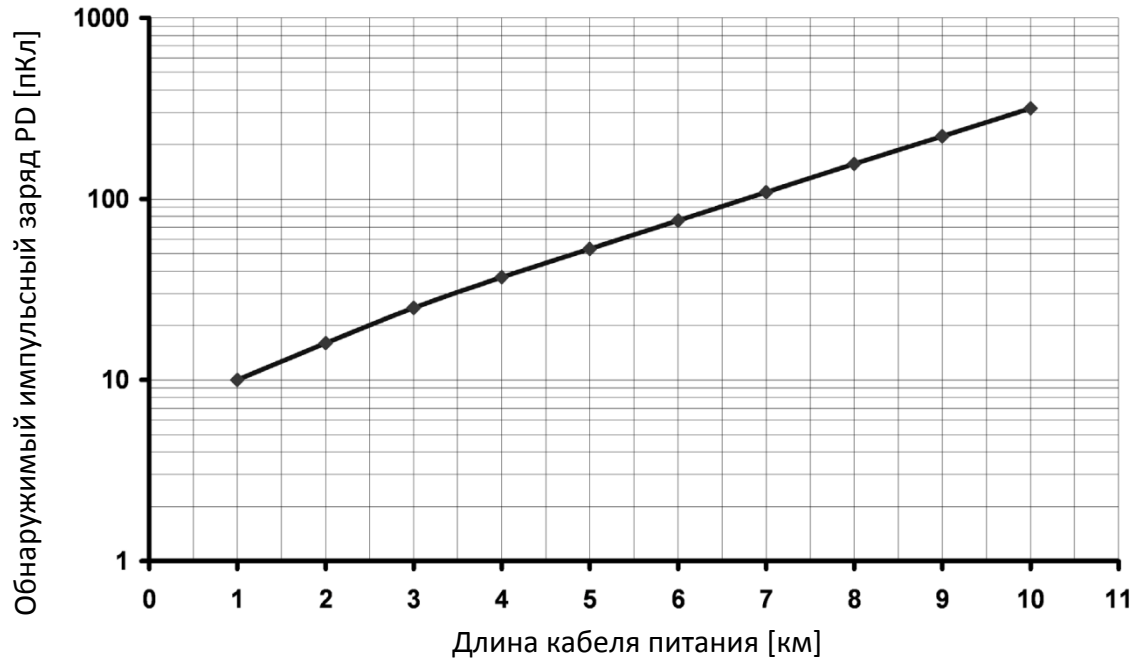


Рис. D.3— Пример блок-схемы принятия решения для обнаружения частичного разряда при испытании путем подачи затухающего переменного напряжения после установки кабельной концевой заделки.

Точные измерения частичного разряда согласно стандартам IEC 60270 и IEC 60885-3 могут применяться только для кабеля длиной до нескольких километров. При большей длине кабеля, например, 10 км и более, пороговый предел частичного разряда существенно увеличивается из-за ослабления и дисперсии распространяющихся импульсов частичного разряда (см. рис. D.4).



Из технической брошюры 297 «Practical aspects of the detection of partial discharges in power cables» (Практические аспекты обнаружения частичных разрядов в кабелях питания), 2006 © CIGRE. Используется с разрешения.

Рис. D.4— Чувствительность обнаружения частичного разряда в зависимости от длины кабеля, рассчитанная на основании эталонного значения 10 пКл, достигаемого для силовых кабелей длиной 1 км [B57]

Приложение Е (справочное)

Результаты Международного опроса на тему использования затухающего переменного напряжения для испытания силовых кабелей СН и (С)ВН

При испытаниях путем подачи затухающего переменного напряжения используется затухающее переменное напряжение при частотах от 20 Гц до 500 Гц [B29], [B51], [B69], [B72]. В системах DAC фактическая частота напряжения зависит от емкости кабеля и используемого индуктора. Для длин кабелей, которые приводят к частоте колебаний выше 500 Гц, может использоваться емкость с дополнительной нагрузкой. Оборудование для проведения испытаний путем подачи затухающего переменного напряжения генерирует затухающее синусоидальное напряжение с довольно слабым затуханием. Для оценки использования и опыта применения технологии DAC для испытания и диагностики кабельных цепей питания осенью 2012 года был проведен международный опрос. С 1999 года для проверки кабельных сетей СН (от 6 кВ до 35 кВ) и кабельных сетей ВН (от 36 кВ до 230 кВ) в общей сложности пять международных поставщиков предоставили технологию DAC около 300 пользователей. Это исследование является результатом опроса пользователей, проведенного членами (производителями, поставщиками услуг, коммунальными предприятиями) рабочей группы, оно не обеспечивает каких-либо систематических доказательств и должно рассматриваться в качестве описания современного уровня развития техники. На опрос ответило около 38% (69,2% пользователей СН и 34% пользователей СН) 120 пользователей (см. таблицу Е.1). Все пользователи были разделены на три категории (см. таблицу Е.2).

Таблица Е.1— Географическое распределение ответов, полученных в ходе опроса.

Европа	72%
Азия	21%
Африка	5%
Америка	2%

Таблица Е.2— Период опыта проведения испытаний путем подачи затухающего переменного напряжения.

Более 5 лет	35%
От 1 до 5 лет	53%
Менее 1 года	12%

По мнению большинства пользователей затухающее переменное напряжение используется для испытаний после укладки кабеля, после ремонта и для оценки состояния (см. таблицу Е.3). В целом около 90% респондентов, проводящих испытания кабелей С(ВН), используют DAC для целей оценки состояния и около 67% этих пользователей проводят испытания путем подачи затухающего переменного напряжения для целей проверки после укладки и (или) после проведения ремонтных работ.

Таблица Е.3—Цель испытания путем подачи затухающего переменного напряжения.

Испытания после укладки кабеля	СН 58,8%
	(С) ВН 66,7%
Испытания после ремонта	СН 82,53%
	(С) ВН 66,7%
Испытания для оценки состояния	СН 76,5%
	(С) ВН 88,9%

Что касается типа кабельной изоляции, каждый респондент проводит испытания кабелей XLPE путем подачи затухающего переменного напряжения. Большинство респондентов путем подачи затухающего переменного напряжения также тестируют маслонаполненные кабели (см. рис. Е.1).

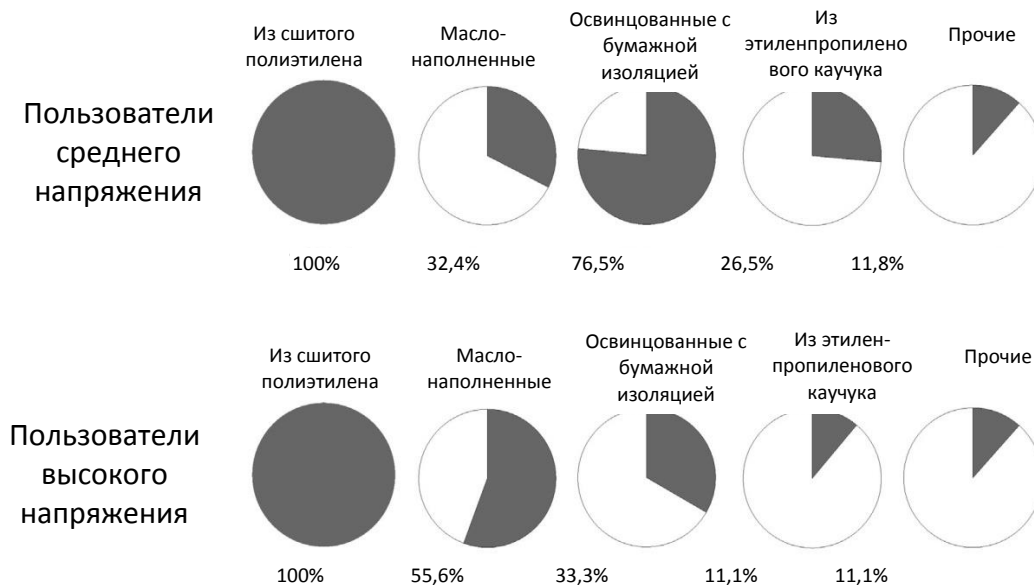


Рис. Е.1— Типы кабельной изоляции, испытываемые респондентами.

Процедурой испытания, применяемой большинством респондентов, является контролируемое испытание напряжением, которое предполагает сочетание испытаний путем подачи затухающего переменного напряжения с измерением частичного разряда (см. таблицу Е.4). Большинство опрошенных, которые используют испытания путем подачи затухающего переменного напряжения для кабелей среднего и высокого напряжения, используют затухающее переменное напряжение для проведения испытаний на электрическую прочность (см. таблицу Е.5). Максимальные уровни испытательного напряжения, а также количество воздействий затухающим переменным напряжением для кабелей среднего и высокого (сверхвысокого) напряжения, применяемые к различным типам испытаний, соответствуют указанным в таблице А.1 и таблице А.2 в приложении А (см. таблицу Е.6).

Таблица Е.4—Методы испытаний

	СН	(С)ВН
Испытание путем подачи затухающего переменного напряжения без измерения частичного разряда	28%	22%
Испытание путем подачи затухающего переменного напряжения с измерением частичного разряда	72%	78%

Таблица Е.5—Применение испытаний на электрическую прочность путем подачи затухающего переменного напряжения

	Да	Нет
Кабели СН (6-35 кВ)	38%	62%
Кабели (С)ВН (36-230 кВ)	89%	11%

Таблица Е.6—Процедура испытания путем подачи затухающего переменного напряжения

Параметр		Испытания после укладки кабеля	Испытания после ремонта	Испытания для оценки состояния
Максимальное испытательное напряжение	СН (6 кВ – 35кВ)	$1,7 U_0 - 2,0 U_0$	$1,7 U_0 - 2,0 U_0$	$1,7 U_0$
	(С)ВН (36 кВ – 230 кВ)	$1,4 U_0 - 1,7 U_0$	$1,4 U_0 - 1,7 U_0$	$1,4 U_0$
Количество воздействий затухающим переменным напряжением /уровень напряжения		1 – 10 возбуждений		
Количество воздействий затухающим переменным напряжением для испытания на электрическую прочность при максимальном испытательном напряжении		50 возбуждений или 1 ч	50 возбуждений или 1 ч, или по согласованию	По согласованию

Что касается опытных данных, полученных во время испытаний, 40% респондентов во время испытания наблюдали пробой изоляции, и в более чем 70% этих случаев частичного разряда были обнаружены PD до пробоя (см. рис. Е.2).

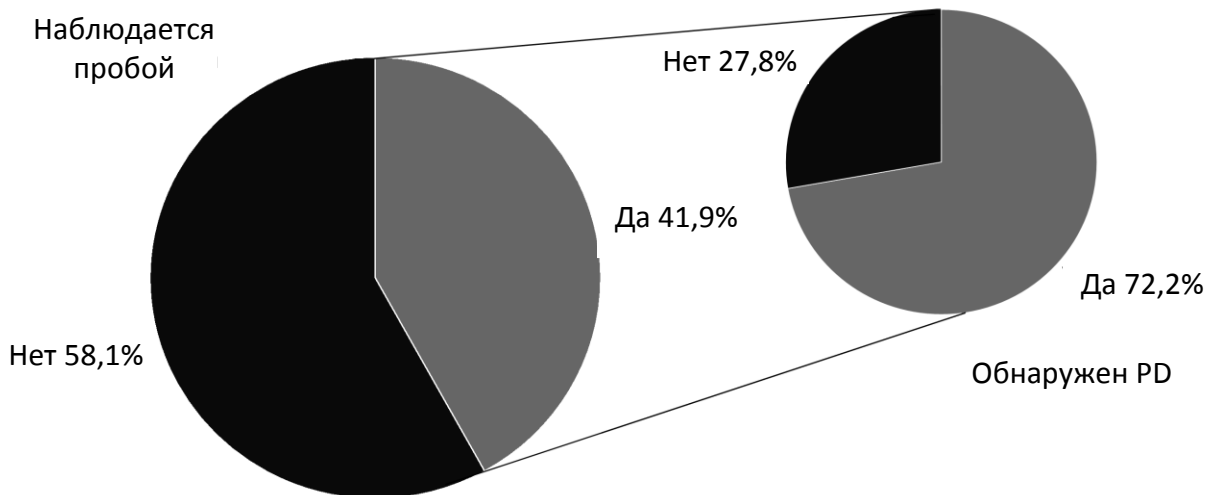


Рис. Е.2—Опытные данные респондентов (38% опрошенных), касающиеся возникновения пробоя при испытании путем подачи затухающего переменного напряжения и обнаружения частичного разряда.

Приложение F

(справочное)

Bibliography

Bibliographical references are resources that provide additional or helpful material but do not need to be understood or used to implement this standard. Reference to these resources is made for informational use only.

[B1] Agoris, P.D., “Sensitivity verification of radio frequency partial discharge detection in high voltage equipment.” PhD thesis, TU Delft, 2009.

[B2] ANSI/ICEA S-108-720-2012, Extruded Insulation Power Cables Rated Above 46 Through 345 kV.^{10,11}

[B3] Aucourt, C. and M. Louis, “After Laying Test of Accessories of Synthetic Insulated Cables with Oscillating Wave,” 6th ISH, New Orleans, August, 1989, Paper No. 47.05.

[B4] Aucourt, C., W. Boone, W. Kalkner, R.D. Naybour, and F. Ombello, “Recommendations for a New After Laying Test Method for High Voltage Extruded Cable Systems,” August, 1990, CIGRE Paper No. 21-105.

[B5] Bach, R., and W. Kalkner, “Comparative Study on Alternative test voltages for layed Medium Voltage cables,” 7th, ISH, Dresden, August 1991, Paper No. 23.13.

[B6] Bartnikas, R. and K.D. Srivastava, *Power and Communication Cables*. New York: J. Wiley and Sons/IEEE Press, 2003.

[B7] Boggs, S. and R.J. Densley, “Fundamentals of partial discharge in the context of field cable testing,” *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 16, no. 5, 2000, pp. 13–18.¹²

[B8] Boggs S., A. Pathak, and P. Walker, “Partial Discharge XXII: High Frequency Attenuation in Shielded Solid Dielectric Power Cable and Implications Thereof for частичного разряда location,” *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 12, no. 1, January/February 1996.

[B9] Brettschneider, S., E. Lemke, J.L. Hinkle, and M. Schneider, “Recent Field Experiences in частичного разряда Assessment of Power Cables Using Oscillating Voltage Waveforms,” IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Boston, April 7–10, 2002, pp. 546–552.

[B10] Cichecki P., R.A. Jongen, E. Gulski, and J.J. Smit, “Statistical approach in power cables diagnostic data analysis,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 15, no. 6, 2008, 1559–1569.

[B11] CIGRE WG D1.33 Technical Brochure On-site testing and частичного разряда measurements, (to be published)

[B12] Densley, J., “Ageing Mechanisms and Diagnostics for Power Cables—An Overview,” *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 17 No. 1, pp14–21, Jan/Feb 2001.

[B13] Dissado, L.A., C. Laurent, G.C. Montanari and P.H.F. Morshuis, “Demonstrating a Threshold for Trapped Space Charge Accumulation in Solid Dielectrics under dc Fields,” *IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation*, vol. 12, no. 3, 2005, pp 612–620.

[B14] *Electrical Power Cable Engineering*, Third Edition, Thue, W., ed. CRC Press, 2012.

¹⁰ ANSI publications are available from the Sales Department, American National Standards Institute, 25 West 43rd Street, 4th Floor, New York, NY 10036, USA (<http://www.ansi.org/>).

¹¹ ICEA publications are available from the Insulated Cable Engineers Association, ICEA P.O. Box 1568 Carrollton, GA 30112, USA (<http://www.icea.net/>).

¹² IEEE publications are available from The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 445 Hoes Lane, Piscataway, NJ 08854, USA (<http://standards.ieee.org/>).

- [B15] Farneti, F., F. Ombello, E. Bertani, E., and W. Mosca, “After-laying Test of Extruded Insulation Cable Links,” 6th ISH, New Orleans, August, 1989, paper No. 45.02.
- [B16] Farneti, F., F. Ombello, E. Bertani, and W. Mosca, “Generation of Oscillating Waves for After-laying Test of HV Extruded Cable Links,” Cigre 1990, 26 August–1 September, 1990, paper 21-110.
- [B17] “Guidelines for unconventional partial discharge measurements,” Cigré WG D1.33, TB 444, 2010.
- [B18] Gulski E., et al., “Condition Assessment of Transmission Power Cables,” CIGRE 2010, Paper D1-205-2010.
- [B19] Gulski, E., P. Chojnowski, A. Rakowska, and K. Siodła, “Importance of sensitive on-site testing and diagnosis of transmission power cables, *Przegląd Elektrotechniczny*, R 85, Nr. 2/2009 pp.171–176.
- [B20] Gulski E., P. Cichecki, Z. Jiankang, X. Rong, R. Jongen, P.P. Seitz, A. Porsche, and L. Huang, “Practical aspects of on-site testing and diagnosis of transmission power cables in China,” CMD2010.
- [B21] Gulski, E., P Cichecki, and J.J. Smit, “Condition Assessment of Service Aged HV Power Cables,” Cigre, Paris, 2008, Paper D1-206.
- [B22] Gulski, E., P. Cichecki, J.J. Smit, F. de Vries, J. Pellis, and F.J. Wester, “Condition Assessment of Transmission Power Cables,” 8th Jicable, 2011, paper B.6.2.
- [B23] Gulski E., P. Cichecki, F.J. Wester, J.J. Smit, R. Bodega, T.J.W.H. Hermans, P.P. Seitz, B. Quak, and F. de Vries, “On-site testing and частичного разряда diagnosis of high voltage power cables,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 15, no. 6, pp. 1691–1700, 2008.
- [B24] Gulski, E., F. de Vries, P. Cichecki, and J.J. Smit, “Modern Methods of Installing and Diagnostic Testing of Distribution Power Cables,” 8th Jicable, 2011, paper C.4.4.
- [B25] Gulski, E., E. Lemke, M. Gamlin, E. Gockenbach, W. Hauschild, and E. Pultrum, “Experiences in partial discharge detection of distribution power cable systems,” Cigre, vol. 208, 2003, pp. 34–43.
- [B26] Gulski E. and R. Patterson, “Importance of On-site Testing and Diagnosis of Power Cables,” NETA PowerTest 2011 Conference, Washington D.C.
- [B27] Gulski, E., H. Putter, and J.J. Smit, “Investigation of water treeing—electrical treeing transition in power cables,” Proceedings of 2008 International conference on condition monitoring and diagnosis CMD 2008, pp. 234–237.
- [B28] Gulski, E., A. Rakowska, K. Siodła, and P. Chojnowski, “On-site Testing and Diagnosis of transmission power cables,” *Przegląd Elektrotechniczny*, R 85, Nr. 4/2009 pp.195–200.
- [B29] Gulski, E., A. Rakowska, K. Siodła, P. Cichecki, L.D. Post, and J.J. Smit, “Implementation of Modern Methods of On-site Testing and Diagnosis of HV Power Cables,” 8th Jicable, 2011, paper D.3.4.
- [B30] Gulski, E., J.J. Smit, and F.J. Wester, “частичного разряда knowledge rules for insulation condition assessment of distribution power cables,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2005
- [B31] Gulski, E., F.J. Wester, J.J. Smit, P.N. Seitz, and M. Turner, “Advanced partial discharge diagnostic of MV power cable system using oscillating wave test system,” *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 16, no. 2, 2000, pp. 17–25.
- [B32] Hauschild, W., “Critical Review of Voltages Applied for Quality-Acceptance and Diagnostic Field Tests on High-Voltage and Extra-High-Voltage Cable Systems,” *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 29, no. 2, March/April 2013, pp 16–25.
- [B33] Hernandez Mejia, J.C., J. Perkel, R. Harley, M. Begovic, R.N. Hampton, and R. Hartlein, “Determining Routes for the Analysis of Partial Discharge Signals Derived from the Field,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 15, no. 6; December 2008.
- [B34] Houtepen, R., et al., “Estimation of Dielectric Loss using Damped AC Voltages,” *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 27, no.3, May/June 2011, pp 14–19.

- [B35] IEC 60060-1, High Voltage Test Techniques—Part 1: General Definitions and Test Requirements.¹³
- [B36] IEC 60060-2, High Voltage Test Techniques—Part 2: Measuring Systems.
- [B37] IEC 60141-1, Test on oil-filled and gas pressure cables and their accessories—Part 1: Oil-filled, paper-insulated, metal-sheathed cables and accessories for alternating voltages up to 400 kV.
- [B38] IEC 60141-3, Test on oil-filled and gas pressure cables and their accessories—Part 3: External gas-pressure (gas compression) cables and accessories for alternating voltages up to 275 kV
- [B39] IEC 60502-2, Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV ($U_m = 1,2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV)—Part 2: Cables for rated voltages from 6 kV ($U_m = 7,2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV).
- [B40] IEC 60840, Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 30 kV ($U_m = 36$ kV) up to 150 kV ($U_m = 170$ kV)—Test methods and requirements.
- [B41] IEC 62067, Standard Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 150 kV ($U_m = 170$ kV) up to 500 kV ($U_m = 550$ kV)—Test methods and requirements.
- [B42] IEC 62478, High Voltage Test Techniques: Measurement of Partial Discharges by Electromagnetic and Acoustic Methods (Draft under preparation).
- [B43] IEEE Std 48™-2009, IEEE Standard for Test Procedures and Requirements for Alternating-Current Cable Terminations Used on Shielded Cables Having Laminated Insulation Rated 2.5 kV through 765 kV or Extruded Insulation Rated 2.5 kV through 500 kV.¹⁴
- [B44] IEEE Std 386™-2006, IEEE Standard for Separable Insulated Connector Systems for Power Distribution Systems Above 600 V.
- [B45] IEEE Std 400™-2012, IEEE Guide for Field Testing and Evaluation of the Insulation of Shielded Power Cable Systems Rated 5 kV and Above.
- [B46] IEEE Std 400.1™, IEEE Guide for Field Testing of Laminated Dielectric, Shielded Power Cable Systems Rated 5 kV and Above with High Voltage Direct Current.
- [B47] IEEE Std 400.2™, IEEE Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Using Very Low Frequency (VLF) (less than 1 Hz).
- [B48] IEEE Std 404™-2012, IEEE Standard for Extruded and Laminated Dielectric Shielded Cable Joints Rated 2.5 kV to 500 kV.
- [B49] IEEE Std 1425™, IEEE Guide for the evaluation of the Remaining Life of Impregnated Paper Insulated Transmission Cable Systems.
- [B50] James, R.E., and Q. Su, *Condition Assessment of HV Insulation in Power System Equipment*. London: ITE, 2008.
- [B51] Jongen, R., P.P. Seitz, B. Quak, F. de Vries, and P. Cichecki, “New Generation of On-site Testing Technology for Transmission Power Cables,” 8th Jicable 2011, paper A.8.3.
- [B52] Koevoets, R.C.A.M., “A New After Laying Dielectric Test for Underground High-Voltage Extruded Cables,” *Conference Record of 1990 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, Toronto, June, 1990.
- [B53] Kreuger, F.H., *Industrial High DC Voltage*. Delft University Press, 1995, pp. 1–34.
- [B54] Kreuger, F.H., *Industrial High Voltage*. Delft University Press, 1991, pp. 109–150.

¹³ IEC publications are available from the Sales Department of the International Electrotechnical Commission, 3 rue de Varembe, PO Box 131, CH-1211, Geneva 20, Switzerland (<http://www.iec.ch/>). IEC publications are also available in the United States from the Sales Department, American National Standards Institute, 25 West 43rd Street, 4th Floor, New York, NY 10036, USA (<http://www.ansi.org>).

¹⁴ The IEEE standards or products referred to in this clause are trademarks of The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.

- [B55] Kreuger F.H., M.G. Wezelenburg, A.G. Wiemer, and W.A. Sonneveld, "Partial discharge Part XVIII: Errors in the location of partial discharges in high voltage solid dielectric cables," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 9, no. 6, November/December 1993, pp. 15–22.
- [B56] Lemke, E., "A new method for частичного разряда measurement of polyethylene insulated power cables," 3rd. ISH Milan, 1979, paper 43.13.
- [B57] Lemke, E., E. Gulski, W. Hauschild, R. Malewski, P. Mohaupt, M. Muhr, J. Rickmann, T. Strehl, and F.J. Wester, "Practical aspects of the detection of partial discharges in power cables," CIGRE WG D1.33.TF 05, Technical Brochure 297, Electra No. 232, pp. 63-70, 2006.
- [B58] Lemke, E. and P. Schmiegel, "Complex discharge analyzing (CDA)—An alternative procedure for diagnosis tests of HV power apparatus of extremely high capacity" 9th ISH, Graz, 1995, paper 5617.
- [B59] Lemke, E. and T. Strehl, "Advanced measuring system for analysis of dielectric parameters including частичного разряда events," Jicable 1999, paper A9.4, pp. 302–306.
- [B60] Lemke, E., T. Strehl, and M. Boltze, "Advanced diagnostic tool for частичного разряда fault location in power cables using the CDA technology," 13th International Symposium on High Voltage Engineering, Bangalore, paper 6-72, 2001.
- [B61] Maintenance for HV cables and accessories, Cigre Working Group B1.104, Brochure 279
- [B62] Mashikian, M., V. Gonzalez, G. Valdes and C. Katz, "Partial Discharge Location as a Cable Operating Tool," Proceedings of JICABLE 95, Versailles, June 1995, pp. 497–502. Also published in *Revue de l'Electricité et de l'Electronique (REE)*, Dec. 1997.
- [B63] Mashikian, M. S., R. Luther, J.C. McIver, J. Jurcisin, P.W. Spencer, "Evaluation of Field Aged Crosslinked Polyethylene Cables by Partial Discharge Location," presented at IEEE Summer Power Meeting, Vancouver, July 1993.
- [B64] Meijer, S., E. Gulski, P.D. Agoris, P.P. Seitz, T.J.W.H. Hermans, and L. Lamballais, 2006, "Non-Conventional On-Site Partial Discharge Diagnostics of Transmission Power Cable Accessories," Proceedings of the 16th Conference of the Electric Power Supply Industry, 2006.
- [B65] Minutes of the PES ICC Meeting Spring 2008, C-Ad Hoc Meeting on Damped AC Voltage (Oscillating Wave).
- [B66] Minutes PES ICC Meeting Fall 2008, F05D Meeting on Damped AC Voltage Testing.
- [B67] Minutes PES ICC Meeting Spring 2009, F05D Meeting on Damped AC Voltage.
- [B68] NEMA WC74-2006/ANSI/ICEA S-93-639 Shielded Power Cables 5,000–46,000 V.¹⁵
- [B69] Oyegoke, B., P. Hyvonen, M. Aro, N. Gao, and M. Danikas, "Selectivity of Damped AC Voltages (DAC) and VLF Voltages in After-laying Tests of Extruded MV Cable Systems," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 10, no. 5; October 2003.
- [B70] "Partial discharge detection in installed extruded cable systems," Report by CIGRE WG-21 (2000)
- [B71] Peschke, E. and R. von Olhausen, *Cable Systems for High Voltage and Extra-High Voltage*. MCD Verlag, 1999.
- [B72] Petzold, F. and S. Boettcher, "Evaluation of частичного разряда Measurements of MV Cable Systems by Means of a Web Database," 8th Jicable, 2011, paper B.8.1.
- [B73] Plath, R., *Oscillating Voltages als Prüfspannung zur Vor-Ort-Prüfung und TE-Messung kunststoffisolierter Kabel*. Berlin: Verlag Dr. Köster, 1994.
- [B74] Popma J. and J. Pellis, "Diagnostics for high voltage cable systems, proceedings ERA conference on HV plant life extension, Belgium, 23–24 November, 2000.

¹⁵ NEMA publications are available from Global Engineering Documents, 15 Inverness Way East, Englewood, CO 80112, USA (<http://global.ihs.com/>).

- [B75] “Practical aspects of the detection and location of partial discharges in power cables,” CIGRE TF D1.02.05; 2006.
- [B76] Quak, B., F. Petzold, E. Lemke, R. Jongen, and P. Cichecki, “International survey of using damped AC voltages for testing MV and E(HV) power cables,” PES ICC, Pittsburgh, Spring 2013, Sub F.
- [B77] “Remaining Life Management of existing AC Underground Lines,” Cigre, October 2008, W.G. B1.09
- [B78] Seitz, P.P., B. Quak, E. Gulski, J.J. Smit, P. Cichecki, F. de Vries, and F. Petzold, “Novel Method for On-site Testing and Diagnosis of Transmission Cables up to 250kV,” *Proceedings Jicable '07*, 7th Intern. Conf. Insulated Power Cables, Versailles, 2007, Paper 16.
- [B79] Steiner, J.P. and B.H. Ward, “Partial discharge measurements and pulsed resonant wave excitation,” IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Baltimore, June 7-10, 1992, pp. 389–392.
- [B80] Takada T., “Acoustic and Optical Methods for Measuring Electric Charge Distributions in Dielectrics,” *IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation*, vol.6, no. 5, 1999, pp.519–547.
- [B81] Takahashi, T., T. Takahashi, and T. Okamoto, “Insulation Diagnosis for XLPE Cables Using Damping Oscillating High Voltage,” 2008 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena.
- [B82] Tamus, Z.A., R. Cselsko, T. Schachinger, and R. Egyed, “Experiences of Diagnosis of HV Cables by Damped AC Technique,” 8th Jicable, 2011, paper E.5.2.16.
- [B83] Thomson, E.T., “A Survey of Unconventional Methods of Testing Power Cables Having Extruded Solid Insulation,” 7th ISH, Dresden, August, 1991, Paper No. 53.01.
- [B84] Voigt G. and P. Mohaupt, “Partial Discharge Measurements on Service Aged Medium Voltage Cables at Different Frequencies,” *Proceedings Jicable 2003*, 6th Intern. Conference Insulated Power Cables, Versailles, 2003.
- [B85] Ward, B.H. and J.P. Steiner, “An Alternative to DC Testing of Installed Polymeric Power Cables,” 7th ISH, Dresden, August, 1991, Paper No. 75.06.
- [B86] Wester, F.J., *Condition Assessment of Power Cables Using частичного разряда Diagnosis at Damped AC Voltages*. Rotterdam, The Netherlands: Optima, 2004.
- [B87] Wester, F.J., E. Gulski and J.J. Smit, “Detection of частичного разряда at Different AC Voltage Stresses in Power Cables,” *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 23, no. 4, 2007, pp.28–43.

Consensus

WE BUILD IT.

Connect with us on:

Facebook: <https://www.facebook.com/ieeesa>

Twitter: @ieeesa

LinkedIn: <http://www.linkedin.com/groups/IEEESA-Official-IEEE-Standards-Association-1791118>

IEEE-SA Standards Insight blog: <http://standardsinsight.com>

YouTube: IEEE-SA Channel

IEEE

standards.ieee.org

Phone: + 1 732 981 0060

Fax: + 1 732 562 1571

©IEEE