

Начало в №2'2015

# Усовершенствованная оптимальная процедура проектирования

## ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ кабельной арматуры

**К. Вонг (X. Wang)**  
**С. С. Вонг (C. C. Wang)**  
**К. Ву (K. Wu)**  
**Д. М. Ту (D. M. Tu)**  
**С. Лью (S. Liu)**  
**Дж. К. Пенг (J. K. Peng)**

**Перевод:**  
**Святослав Юрьев**

### Влияние процесса расширения и деформации на электрическое поле в реальных кабельных муфтах

#### Метод деформации и восстановления в кабельной арматуре

#### Расширение и деформирование структуры изготовленной на заводе арматуры в структуру, возникающую после монтажа кабельного соединения

Для расчета процесса расширения кабельной арматуры необходимы следующие данные:

- Внешний радиус изоляции кабеля, использующийся как внутренний радиус кабельной муфты после расширения, —  $R_1'$ .
- Внутренний радиус кабельной муфты до ее расширения —  $R_1$ .
- Внешний радиус  $R_2$  кабельной муфты до ее расширения, который может быть вычислен на основе заданной толщины кабельной муфты  $d$ , т. е.  $R_2 = R_1 + d$ .

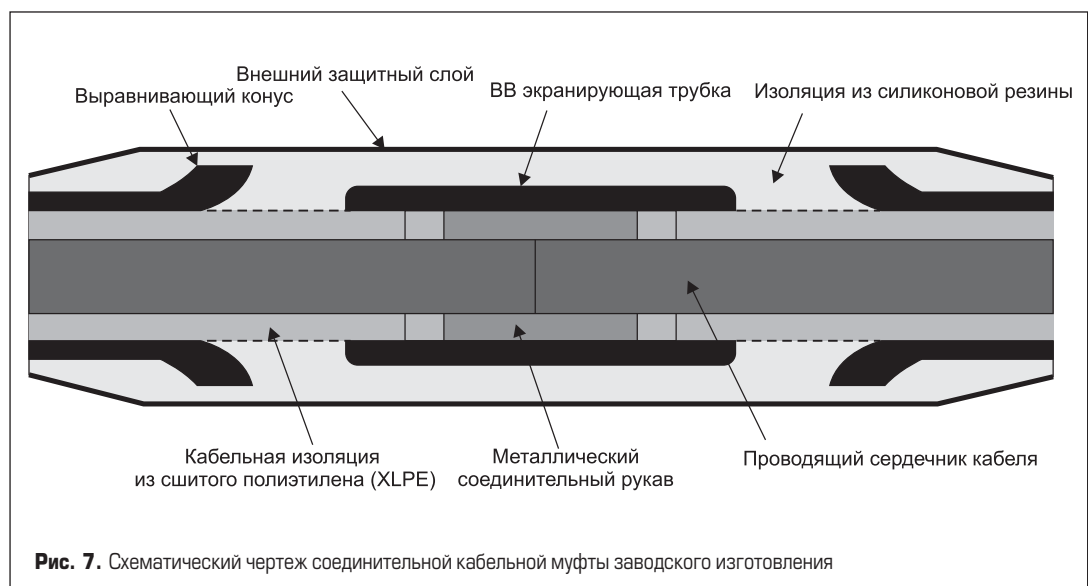
В итоге, используя вышеупомянутые уравнения для деформации и смещения и известные исходные данные, можно без труда вычислить деформацию кабельной муфты после ее расширения в процессе монтажа.

#### Релаксация и восстановление смонтированной кабельной структуры до структуры, изготовленной на заводе

Для расчета процесса релаксации (перехода в ненапряженное состояние) необходимы следующие данные:

- Радиус внешней поверхности изоляции кабеля, использующийся в качестве внутреннего радиуса кабельной муфты после процесса расширения, —  $R_1'$ .
- Внешний радиус кабельной муфты после процесса расширения —  $R_2'$ .
- Внутренний радиус кабельной арматуры после процесса релаксации  $R_1$ , который может быть вычислен с использованием диапазона усадки кабельной муфты  $l$ , т. е.  $R_1 = R_1' - l$ .

Таким образом, используя уравнения деформации и смещения и заданные исходные данные, можно



**Рис. 7.** Схематический чертеж соединительной кабельной муфты заводского изготовления

рассчитать размеры восстановленной после релаксации кабельной арматуры.

### Структура и параметры кабельной арматуры

Известно, что к кабельной арматуре относятся соединительные и концевые муфты. В кабельной системе соединительные всегда менее прочны, чем концевые. Поэтому в настоящей работе рассматриваются только ситуации, относящиеся к соединительным муфтам. Для исследования были выбраны отечественные муфты с независимым выравнивающим конусом заводского изготовления. Они предназначены для соединения кабелей с площадью поперечного сечения, равной 630 мм<sup>2</sup>. Детальная структура такой муфты показана на рис. 7.

В общем случае кабельная муфта состоит из полого высокоэластичного резинового цилиндрического корпуса, в конструкцию которого обычно входят высоковольтная (ВВ) экранирующая трубка, выравнивающий конус, изоляция из силиконовой резины и внешний защитный слой. Экранирующая трубка здесь используется для защиты проводящего соединения жил двух кабелей. Выравнивающий конус предназначен для выравнивания электрического поля в точках среза внешних полупроводящих слоев обеих кабелей. Заметим, что наиболее критическими зонами, влияющими на электрические характеристики кабельного соединения, являются области существования электрических полей на концах высоковольтной экранирующей трубки и на границе между изоляцией кабеля и изоляцией соединительной муфты, что показано пунктирными линиями на рис. 7. Поэтому чрезвычайно важно оптимизировать форму концов высоковольтной экранирующей трубки и угол выравнивающего конуса, чтобы обеспечить при проектировании конструкции соединительной муфты возникновение минимальных электрических полей. В таблице 2 приведены известные параметры соединительных муфт заводского изготовления для напряжений 35 и 110 кВ, которые используются для последующего расчета электрических полей.

### Расчет электрического поля в кабельных муфтах при стандартных методах проектирования

#### Стандартный метод проектирования кабельных муфт

Обычно используется приводимый ниже традиционный метод проектирования кабельных муфт. В качестве примера используем конструкцию кабельной муфты заводского изготовления на напряжение 35 кВ (рис. 8).

Во-первых, предположим, что муфта качественно монтируется на кабеле. Оптимальность конструкции была достигнута при проектировании благодаря оптимизации электрического поля при использовании программного продукта ANSYS. Целью такой оптимизации является обеспечение того, чтобы величина полей на границе изоляции кабеля и изоляции соединительной муфты на концах ВВ экранирующей трубки была меньше проектных значений [18] (рис. 9, 10). Следует отметить, что во время оптимизации структура муфты находится в расширенном состоянии. Окончательная оптимизированная структура соединительной муфты заводского изготовления на 35 кВ показана на рис. 8а.

Во-вторых, в соответствии с допустимым для кабельной муфты диапазоном усадки, размеры конструкции заводской муфты получены значительным уменьшением толщины ее внутреннего и наружного диаметров после оптимизации электрического поля (рис. 8а) без изменения объемной структуры и толщины соединения, как показано на рис. 8б.

В-третьих, в соответствии с методом деформаций и восстановления до необходимых размеров заводская конструкция (рис. 8б) снова расширяется, приходя к фактическому монтажному состоянию. При сравнении расширенной структуры (рис. 8в) со структурой, в которой оптимизировано электрическое поле (рис. 8а), видно, что после расширения толщина муфты оказывается меньше, а муфта становится короче. Более того, не только угол выравнивающего конуса, но и форма концов ВВ экранирующей трубки значительно отличаются от исходной конструкции муфты.

Таблица 2. Параметры кабельных муфт заводского изготовления

Параметры	При напряжении, кВ	
	35	110
$R1'$ — внешний радиус изоляции кабеля, или внутренний радиус соединения после монтажа, мм	26,68	32,7
$R1$ — внутренний радиус соединения перед монтажом, мм	17,78	23,8
$l$ — диапазон усадки по радиусу кабельной соединительной муфты, который получается в результате вычитания $R1$ из $R1'$ , мм	8,9	8,9
$d$ — полная толщина соединения, мм	27	51
$L$ — полная длина соединения, мм	435	640

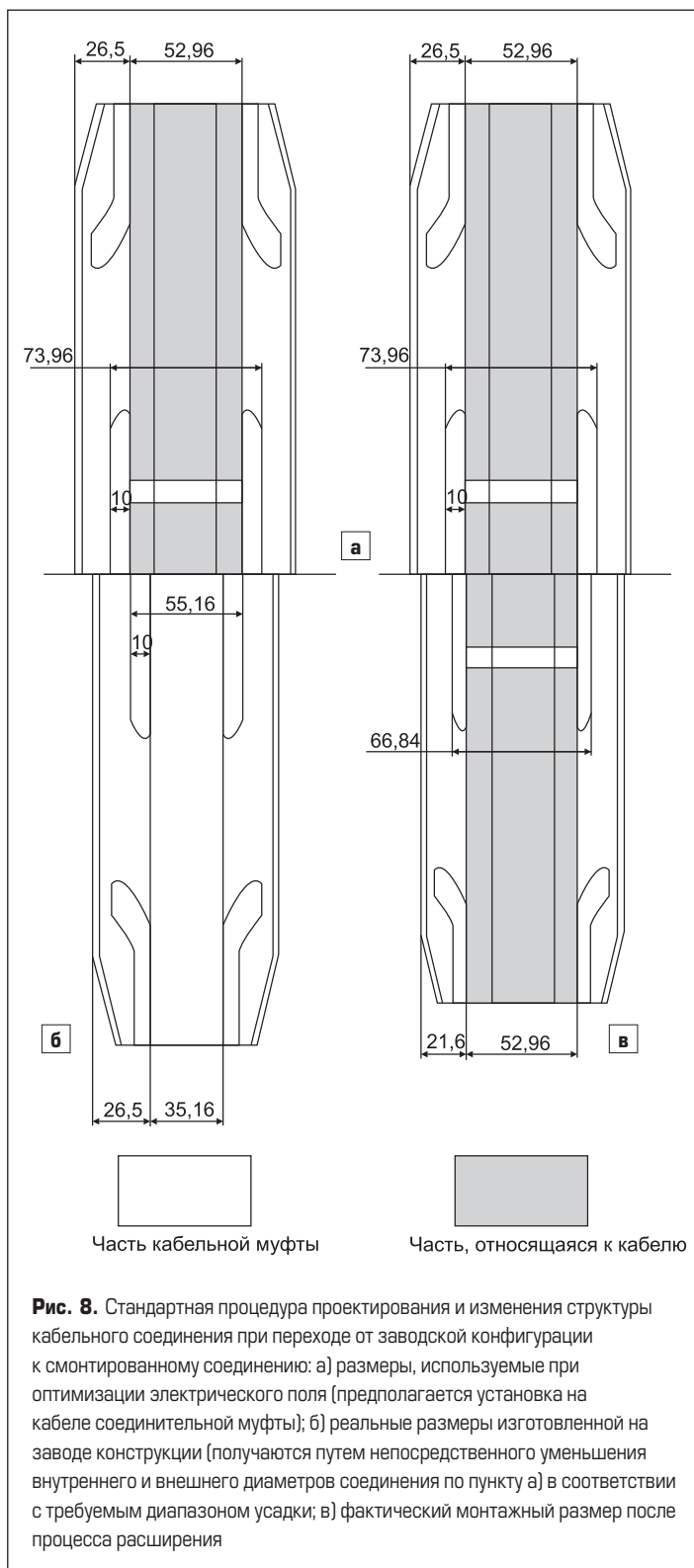


Рис. 8. Стандартная процедура проектирования и изменения структуры кабельного соединения при переходе от заводской конфигурации к смонтированному соединению: а) размеры, используемые при оптимизации электрического поля (предполагается установка на кабеле соединительной муфты); б) реальные размеры изготовленной на заводе конструкции (получаются путем непосредственного уменьшения внутреннего и внешнего диаметров соединения по пункту а) в соответствии с требуемым диапазоном усадки; в) фактический монтажный размер после процесса расширения

**Распределение электрического поля в кабельной муфте на 110 кВ, рассчитанные стандартным методом**

На рис. 11 и 12 показана конфигурация электрических полей в кабельной муфте на 110 кВ после оптимизации структуры (рис. 8а) и после завершения процессов усадки и расширения (рис. 8б и 8в соответственно). При сравнении рис. 11 и 12 видно, что максимум поля на границе возрастает с 1,4 до 1,703 кВ/мм и с 6,2 до 6,754 кВ/мм на конце высоковольтного экрана соответственно.

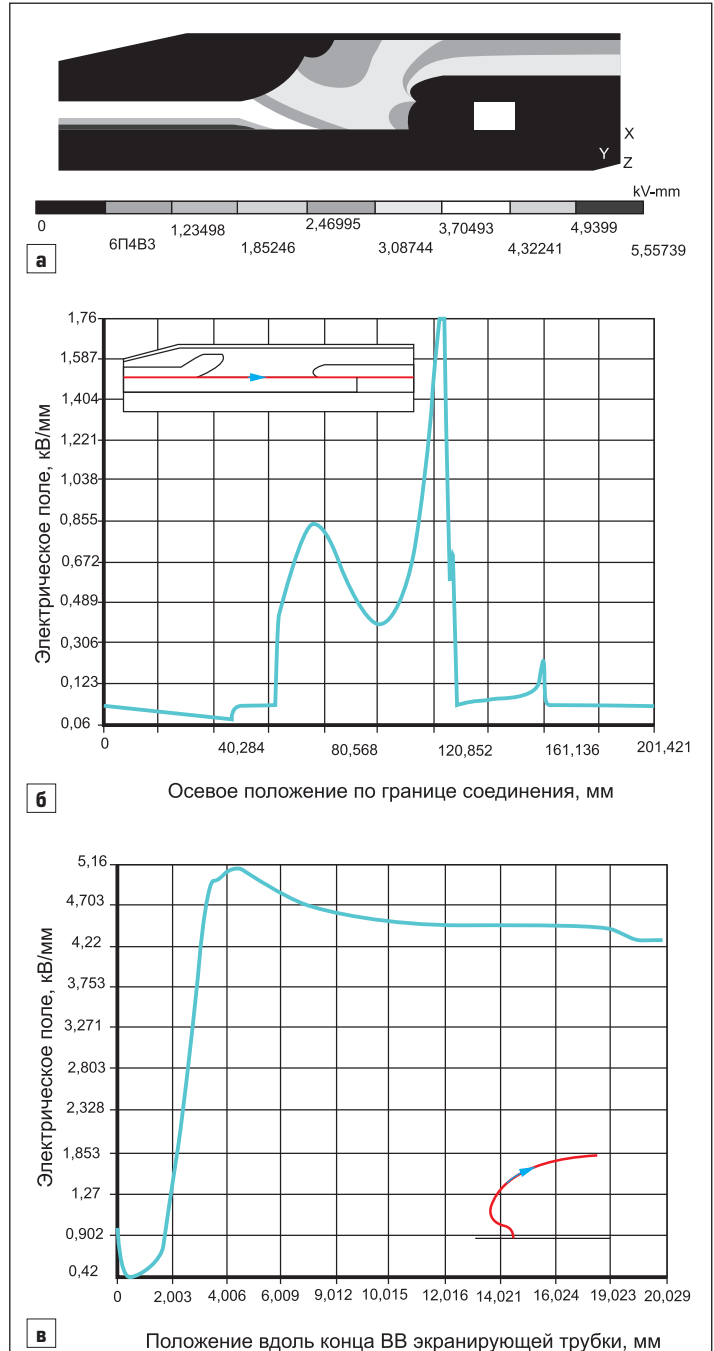
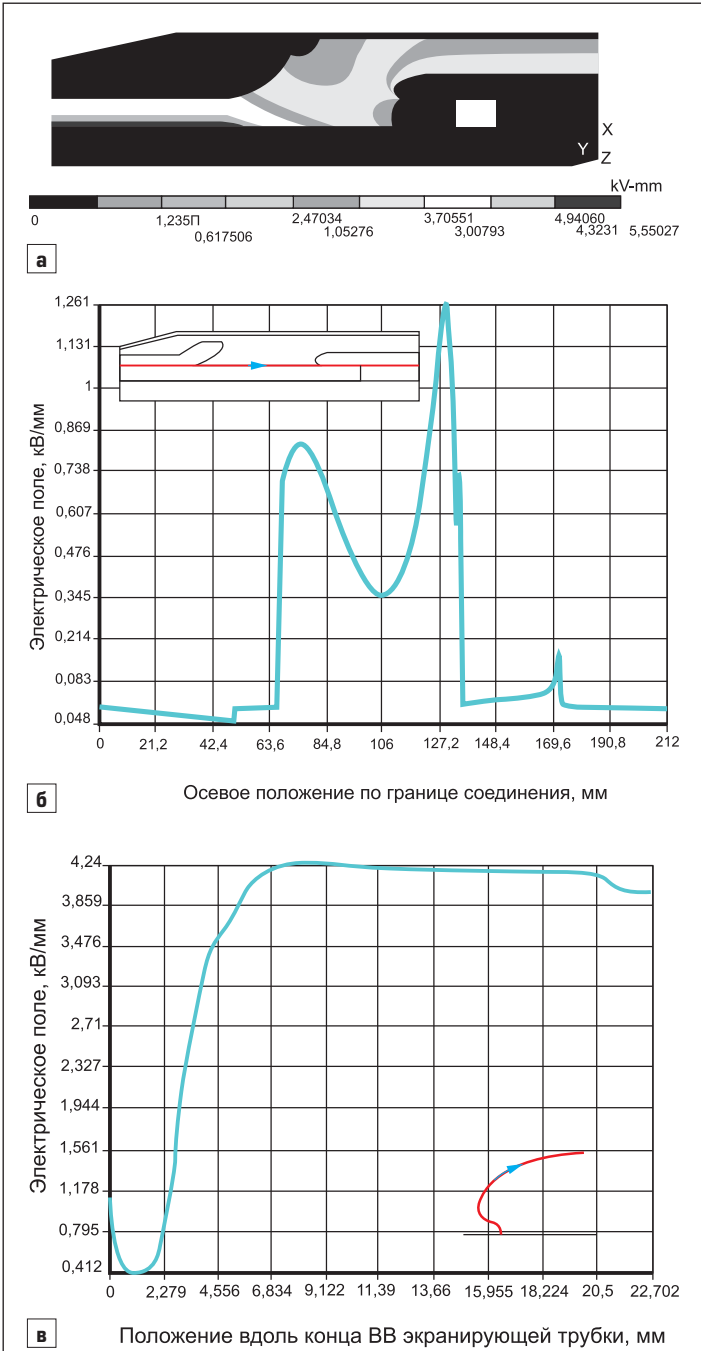
**Усовершенствованная схема проектирования кабельной арматуры**

Как уже было отмечено, не имеет значения, рассчитана ли кабельная арматура на напряжение 35 кВ или 110 кВ стандартным способом, все равно распределения электрического поля после монтажа

отклоняются от оптимальных расчетных значений из-за искажений структуры, появляющихся в процессе расширения соединительной муфты. Чем больше диапазон усадки, тем значительнее искажения структуры. В результате после монтажа муфты это приводит к росту напряженности электрического поля по сравнению с исходными значениями, определенными в результате оптимизации, что, в свою очередь, влияет на эксплуатационную надежность кабельного соединения.

Усовершенствованная схема проектирования кабельной арматуры заключается в следующем.

Во-первых, аналогично стандартной схеме расчета, оптимальная структура получается в результате оптимизации электрического поля посредством применения программного продукта ANSYS в предположении, что кабельная арматура будет качественно монтироваться на кабеле,



**Рис. 9.** Распределение электрического поля в заводской конструкции кабельной соединительной муфты на 35 кВ после оптимизации структуры (рис. 8а): а) цветом показано распределение всего электрического поля в четверти муфты; б) распределение электрического поля на границе соединения ; в) распределение электрического поля на конце ВВ экранирующей трубки

**Рис. 10.** Распределение электрического поля в заводской конструкции кабельной соединительной муфты на 35 кВ после процесса усадки и расширения (рис. 8в): а) цветом показано распределение всего электрического поля в четверти муфты; б) распределение электрического поля на границе соединения; в) распределение электрического поля на конце ВВ экранирующей трубки

находясь при этом в расширенном состоянии. Оптимальная структура кабельной соединительной муфты на 35 кВ показана на рис. 8а.

Во-вторых, в соответствии с методом деформаций и восстановления начальная заводская структура может быть получена в результате процесса перехода кабельной арматуры в релаксированное (ненапряженное) состояние путем восстановления размеров арматуры из расширенного состояния, при котором производилась оптимизация электрического поля. Моделируя (проведя) такой процесс релаксации структуры соединения, можно гарантировать, что после последующего расширения будут сохранены параметры оптимизированной структуры (рис. 9 и 11).

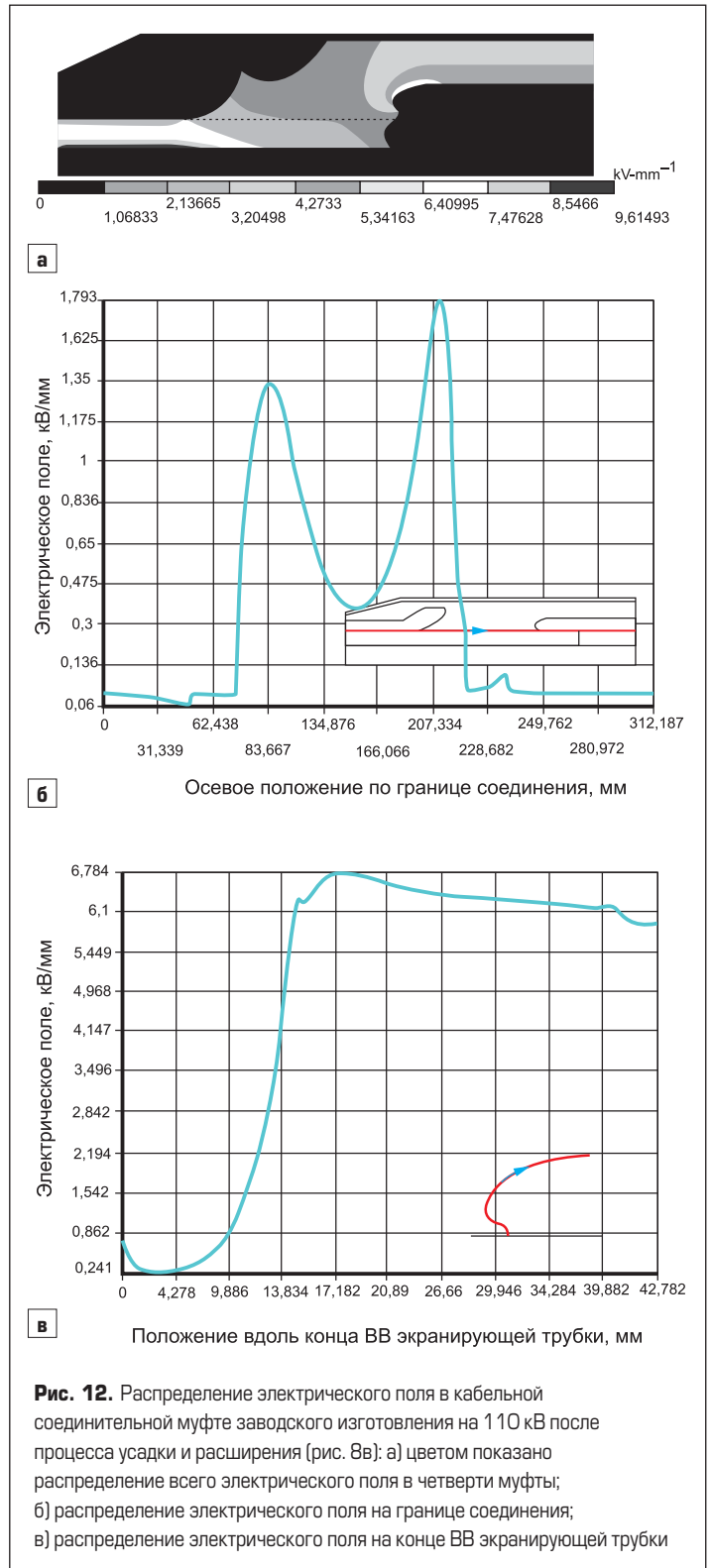
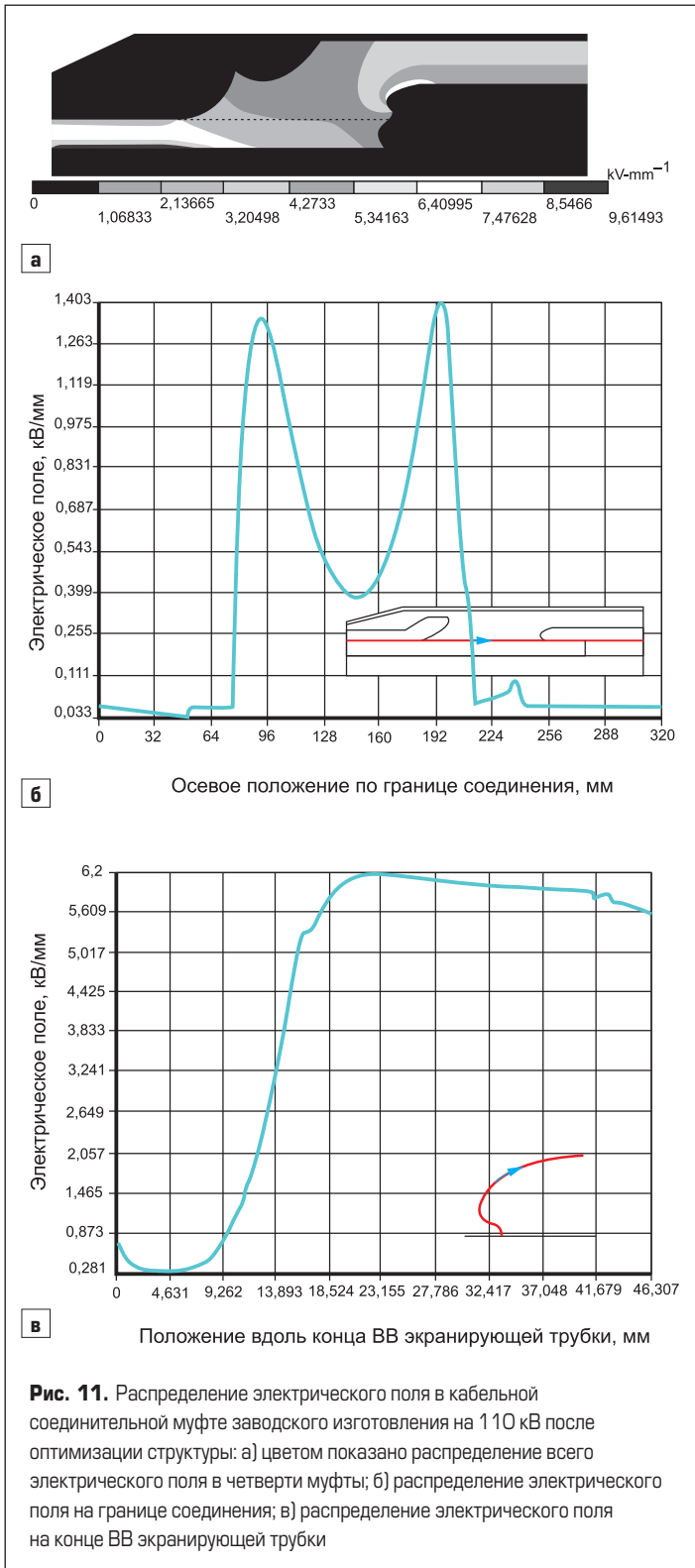
На рис. 13 для половины конструкции упомянутой ранее муфты на 35 кВ заводского изготовления показаны изменения структуры соединительной муфты при переходе от расширенного состояния после монтажа к релаксированной структуре, получаемой при производстве

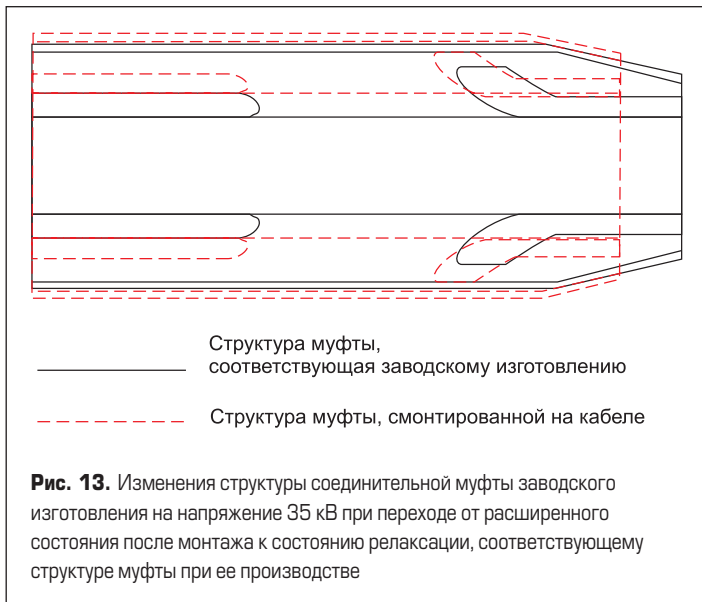
арматуры. На рис. 13 пунктирные линии соответствуют смонтированной на кабеле структуре арматуры, а сплошные — структуре, получаемой при производстве арматуры, до монтажа. Как видно из рис. 13, толщина кабельной арматуры оказывается больше, а полная длина — короче, чем у арматуры в состоянии релаксации. Более того, значительно изменяются не только угол выравнивающего конуса, но и форма концов ВВ экранирующей трубки.

Обсуждение результатов

Подтверждение корректности теоретического анализа

Для проверки корректности полученных выше уравнений деформации кабельной арматуры была выбрана реальная кабельная муфта на напряжение 35 кВ производства корпорации 3М (США). Она была





разрезана на две половины по длине. После этого в одной половине сохранялось состояние, предшествующее расширению (по диаметру) с помощью установленной внутри трубки (спирального корда), а другая находилась в состоянии релаксации (ненапряженном) без спирального корда, что показано на рис. 14.

После удаления спирального корда кабельная муфта возвращается в первоначальное ненапряженное состояние, в котором она находилась после изготовления на заводе. При этом в результате релаксации внутренний и внешний диаметры уменьшаются, а длина увеличивается. Точные значения параметров кабельной муфты в состоянии предварительного расширения и в состоянии релаксации приведены в таблице 3. В соответствии с данными табл. 3, процесс деформации кабельного соединения при переходе от состояния релаксации к состоянию предварительного расширения или из предварительно расширенного состояния (перед монтажом) к состоянию релаксации может быть проанализирован с помощью уравнения деформации (14). Результаты расчета и данные реальных измерений приведены в таблице 4. Из них следует, что расчетные и измеренные данные различаются не более чем на 0,5%.

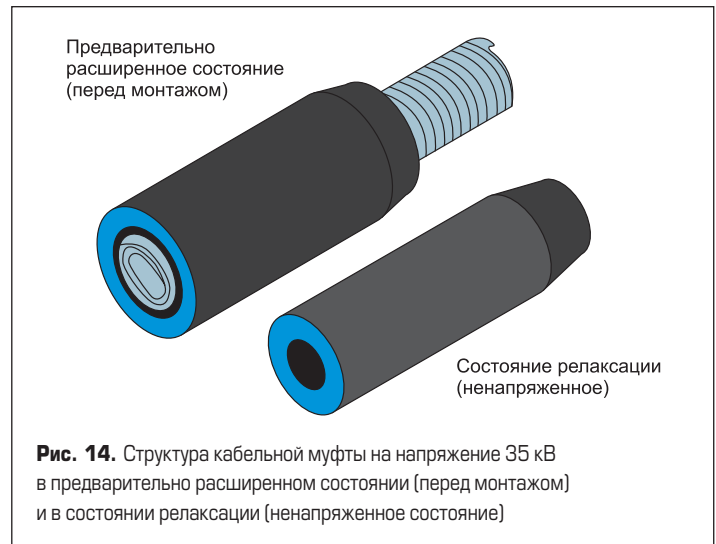
Таким образом, при проектировании кабельной арматуры весьма важно учитывать деформацию во время расширения. При игнорировании этого факта конструктивные параметры кабельной арматуры после монтажа будут существенно отличаться от исходных, полученных в процессе оптимизации, что приводит к утрате смысла самого этого процесса. Кроме того, предложенная в данной статье процедура оптимизации с учетом процессов расширения и деформации кабельной соединительной муфты также может быть применена при проектировании концевой муфты. Эта процедура может быть особенно полезна при изготовлении ВВ или СВВ кабельной арматуры, а также для обеспечения ее надежности при долговременной эксплуатации.

**Соотношение между модулем упругости, коэффициентом расширения и величиной давления на контактной поверхности кабельной арматуры**

Как видно из рис. 9–12, а также из данных таблиц 4 и 5, нами получены коэффициент улучшения характеристик поля и коэффициент относительного расширения серийных кабельных соединительных муфт на напряжения 35 и 110 кВ.

**Таблица 3.** Параметры кабельной муфты на напряжение 35 кВ в предварительно расширенном состоянии и в состоянии релаксации

Параметры	Предварительно расширенное состояние		Состояние релаксации	
	R1'	38,29	R1	15,0
Внутренний радиус, мм	R1'	38,29	R1	15,0
Внешний радиус, мм	R2'	56,53	R2	42,0
Длина половины муфты, мм	255,0		287,5	



Коэффициент улучшения характеристик поля  $F$ , введенный для того, чтобы определить степень искажения поля кабельной арматуры после монтажа:

$$F = \frac{E - E_{opt}}{E_{opt}} \times 100\% , \quad (17)$$

где  $F$  — коэффициент улучшения характеристик поля (напряженности) [%];  $E_{opt}$  — максимальная напряженность электрического поля в кабельной арматуре после оптимизации [кВ/мм];  $E$  — максимальное значение напряженности электрического поля в кабельной арматуре после монтажа [кВ/мм].

Кроме того, введен коэффициент относительного расширения  $\delta$ , который определяет степень расширения внутреннего периметра арматуры по отношению к внешнему периметру кабеля. Он вычисляется следующим образом:

$$\delta = \frac{2\pi R_1' - 2\pi R_1}{2\pi R_1} \times 100\% , \quad (18)$$

где  $\delta$  — коэффициент относительного расширения [%];  $R_1'$  и  $R_1$  — наружный радиус изоляции кабеля и внутренний радиус кабельной муфты до ее монтажа соответственно.

Как видно из данных табл. 5 по кабельной соединительной муфте на 35 кВ, меньшее значение коэффициента относительного расширения для кабельной соединительной муфты на 110 кВ способствует снижению влияния деформации муфты после расширения на распределение электрического поля. Однако чем меньше коэффициент расширения, тем меньше давление на поверхности контакта. Это означает, что уменьшение искажения поля может быть достигнуто путем определенного снижения давления на поверхности контакта.

Как известно, силиконовая резина является превосходным материалом для применения в кабельной арматуре, поскольку она может полно-

**Таблица 4.** Сравнение результатов расчетов и измерений размеров для кабельной соединительной муфты на 35 кВ в процессе расширения и после релаксации

Параметры	Измеренное значение	Расчетное значение
Переход из состояния релаксации в состояние предварительного расширения		
Внешний радиус R2', мм	56,53	56,28
Длина половины муфты, мм	255,0	254,50
Переход из состояния предварительного расширения в состояние релаксации		
Внешний радиус R2, мм	42,0	42,20
Длина половины муфты, мм	287,50	288,10

**Таблица 5.** Параметры серийно изготавливаемых кабельных муфт после растяжения и деформации

Параметры		35 кВ	110 кВ
Коэффициент улучшения характеристик поля F на границе поверхности кабельной арматуры, %		39	21
Коэффициент улучшения характеристик поля F на конце ВВ экранирующей трубки, %		22	8
Коэффициент относительного расширения $\delta$ для кабельного соединения, %		33,4	27,2
Модуль упругости, МПа, при	растяжении	1,4	
	сжатию	3	

стью удовлетворять электрическим, механическим и тепловым требованиям, предъявляемым в настоящее время к полимерным кабелям [19]. В общем, чем шире диапазон усадки, тем больше деформация арматуры во время расширения. К тому же разработка диапазона усадки зависит от значения модуля упругости материала, а также от необходимости создания давления на границе между изоляцией кабеля и изоляцией кабельной арматуры [11]. Более того, изоляция кабельной арматуры из силиконовой резины во время расширения подвергается воздействию не только растягивающего усилия в тангенциальном направлении, но и сдвигающего (компрессионного) усилия в радиальном направлении. Следовательно, чтобы определить степень деформации арматуры во время расширения, важно знать величину модулей упругости для компрессионной и растягивающей составляющих. В общем случае, чем больше модуль упругости, тем меньший диапазон усадки или меньший коэффициент относительного растяжения должна иметь силиконовая резина, чтобы обеспечить необходимое давление по поверхности контакта. Но чем больше будет величина модуля упругости, тем выше окажется жесткость материала. Применение для арматуры изоляции модуля упругости с более высоким значением затрудняет монтаж муфты и даже приводит к появлению трещин в изоляции во время монтажа. Поэтому при проектировании арматуры весьма важно выбирать подходящий тип силиконовой резины. Оптимальная процедура проектирования, предложенная в настоящей работе, может быть использована в качестве руководства по выбору типа силиконовой резины для использования в кабельной арматуре. Кроме того, она способна обеспечить реализацию исходной оптимальной структуры (по размерам и конфигурации) арматуры после монтажа, чтобы обеспечить повышенную надежность высоковольтной кабельной муфты при ее долговременной эксплуатации.

### Заключение

В данной статье предложена улучшенная процедура проектирования, которая обеспечивает получение оптимальных электрических параметров высоковольтной кабельной арматуры после монтажа. В основу этой процедуры положены полученные авторами на базе теории упругой механики уравнения деформации и смещений во время расширения кабельной арматуры при монтаже. Результаты проведенного анализа позволяют сделать следующие выводы.

Деформация и смещение появляются во время расширения кабельной арматуры (муфты). Более того, смещение нелинейно уменьшается в направлении от внутренней поверхности арматуры к наружной.

Расширение кабельной арматуры приводит к уменьшению толщины изоляции и длины арматуры (муфты). А также из-за этого возникают проблемы в арматуре, поскольку угол выравнивающего конуса и форма конца высоковольтной экранирующей трубки могут существенно отличаться от исходно полученных расчетных данных. В результате могут значительно ухудшаться электрические поля (значения напряженности) на границе контакта арматуры и кабеля и на конце ВВ экранирующей трубки кабельной арматуры.

Предложена усовершенствованная процедура проектирования кабельной арматуры. Структура такой арматуры для серийного производства может быть получена путем применения процесса релаксации, восстанавливая кабельную арматуру из расширенного состояния, для которого была проведена оптимизация электрического поля. Использование процесса релаксации кабельной арматуры и получение конструктивных характеристик для этого состояния гарантируют со-

хранение оптимизированной структуры и характеристик электрического поля после завершения монтажа арматуры.

*Авторы выражают благодарность Фонду естественных наук Китая за поддержку проектов № 51377131 и № 509-7050.*

*Оригинал статьи опубликован в журнале IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 21, N 1, February 2014*

### Литература

- Suh K. S., Nam J. H., Kim J. H., Ko K. C. and Han S. O. Interfacial Properties of XLPE/EPDM Laminates // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2000. Vol. 7.
- Zhang X. and Gockenbach E. Component Reliability Modeling of Distribution Systems Based on the Evaluation of Failure Statistics // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2007. Vol. 14.
- Ying Q. L., Wei D., Gao X. Q., Liu Y. G. and Chen P. Development of high voltage XLPE power cable system in China. 6th Int'l/ Conf. Proper. App. Dielectr. Materials (ICPADM) // Xi'an, China. 2000.
- Luo J. H., Shi J. K. and Yuan J. Study on Surface Discharge of Composite Dielectric in XLPE Power Cable Joints // 25th IEEE Conf. Electr. Insul. Cincinnati, USA. 2001.
- Yaroslavskiy V., Walker M., Katz C. and Keefe R. J. Comparative Laboratory Evaluation of Preloaded Joints for Medium Voltage Cables // IEEE Trans. Power. Deliv., 2008. Vol. 23.
- Vivo B. D., Spagnuolo G. and Vitelli M. Variability Analysis of Composite Materials for Stress Relief in Cable Accessories // IEEE Trans. Magnet. 2004. Vol. 40.
- Yonetsu D., Hara T., Shimada S. and Kaji M. Electric Field Optimization of the Power Cable Joint by Using Evolutionary Calculation Method // IEEE Trans. Electron., Information and Systems. 2004. Vol. 123.
- Yonetsu D., Okamoto Y., Hara T., Shimada S. and Kaji M. Examination of General-Purpose Use Electric Field Optimization at the Power Cable Joint by Using Evolution Strategy // IEEE Trans. Electron., Information and Systems. 2004. Vol. 123.
- Norio T., Koji F., Takayoshi N., Yoichi O., Yoshio M. and Ken Y. Nonlinear Transient Analysis of Electric Field Coupled with Temperature at the Joint of a Power Cable // IEEE Trans. Magnet. 1995. Vol. 31.
- Pommerenke D., Jobava R. and Heinrich R. Numerical Simulation of Partial Discharge Propagation in Cable Joints Using the Finite Difference Time Domain Method // IEEE Electr. Insul. Mag. 2002. Vol. 18. N 6.
- Fournier D. and Lamarre L. Effect of Pressure and Temperature on Interfacial Breakdown between Two Dielectric Surfaces // IEEE Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenom. (CEIDP). Victoria, BC, Canada. 1992.
- Jiang Y., Min H., Luo J. H., Li Y., Jiang X. J., Xia R. and Li W. J. Partial Discharge Pattern Characteristic of HV Cable Joints with Typical Artificial Defect. Asia-Pacific // Power Energy Eng. Conf. Chengdu, China. 2010. Vol. 1.
- Du B. X. and Gu L. Effects of Interfacial Pressure on Tracking Failure between XLPE and Silicon Rubber // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2010. Vol. 17.
- Du B. X., Zhu X. H., Gu L. and Liu H. J. Effect of Surface Smoothness on Tracking Mechanism in LPE-Si-Rubber Interfaces // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2011. Vol. 18.
- Ross R. Dealing with interface problems in polymer cable terminations // IEEE Electr. Insul. Mag. 1999. Vol. 15. N 4.
- Hasheminezhad M. and Ildstad E. Application of Contact Analysis on Evaluation of Breakdown Strength and PD Inception Field Strength of Solid-Solid Interfaces // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2012. Vol. 19.
- Slater R. A. C. Engineering Plasticity. — London: Macmillan Press, 1977.
- Peschke E. and Olshausen R. V. Cable Systems for High and Extra-High Voltage: Development, Manufacture, Testing, Installation and Operation of Cables and their Accessories // Publicis MCD Verlag, Erlangen and Munich, 1999.
- Tanaka T. Aging of Polymeric and Composite Insulating Materials Aspects of Interfacial Performance in Aging // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2002. Vol. 9.