

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПОДКЛЮЧЕНИЯ УСТРОЙСТВА ЭЛЕКТРООСМОТИЧЕСКОЙ СУШКИ К ТРАНСФОРМАТОРУ ДЛЯ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ ИЗОЛЯЦИИ

В статье рассматривается нетепловой способ сушки изоляции активной части высоковольтных масляных трансформаторов. Описан процесс моделирования электрического поля в программном комплексе ELCUT на примере трехфазного трансформатора. Определен наиболее эффективный способ подключения устройства электроосмотической сушки к трансформатору.

Электроосмотическая сушка, трансформатор, изоляция активной части, электрическое поле, метод конечных элементов, ELCUT.

В настоящее время в России эксплуатируется большое количество трансформаторов, требующих ремонта. В технологии ремонта масляных трансформаторов важным этапом является сушка изоляции активной части, так как повышенная влажность может привести к ее повреждению и отказу трансформатора.

Распределение количества отказов элементов конструкции трансформаторов составляет:

- продольная и витковая изоляция – 60%;
- вводы – 1%;
- прокладки, баки, система охлаждения – 1%;
- главная изоляция – 19%;
- магнитопровод – 16% [5].

В силовых масляных трансформаторах в качестве твердых изолирующих материалов используются материалы на основе целлюлозы. Строение целлюлозы характеризуется разветвленной системой пор различного размера, начиная от субмикропор (зазоров между молекулами) и кончая грубыми порами, созданными между отдельными волокнами при их переплетении или скручивании в процессе образования бумаги, пряжи или ткани. Вода проникает сквозь все эти поры, располагаясь в межмолекулярных пространствах (размер молекулы воды 0,25 нм) [2], поэтому выход из строя трансформаторов по причине увлажнения изоляции достигает 8% [1].

В настоящее время для сушки изоляции активной части трансформаторов применяют различные методы, такие как циркуляция горячего масла, сушка горячим воздухом, сушка в стационарных сушильных шкафах и др., но все они относятся к тепловым. Удалить влагу, которая находится в изоляции на молекулярном уровне, тепловыми методами практически

невозможно. Однако эта проблема может быть решена с помощью электроосмоса. К тому же техническая реализация тепловых методов связана с немалыми трудностями. Главными из них являются жесткий контроль процесса сушки и недопущение перегрева изоляции. Однако избежать локальных повышений температуры изоляции сверх допустимого предела удастся не всегда. В результате возможны тепловое старение и коробление изоляции. Для тепловой сушки характерны также значительные затраты электроэнергии.

Электроосмотическая сушка (ЭОС) создает условия для перемещения влаги из внутренних слоев изоляции к поверхности, но оно происходит без нагрева изоляции и только под действием сил электрического поля.

На кафедре электрооборудования Вологодского государственного университета много лет проводится работа по применению электрокинетических явлений для сушки, влагозащиты, пропитки и диагностики изоляции различных видов электрооборудования. В результате проделанной работы разработано и успешно применяется высоковольтное устройство ЭОС и влагозащиты трансформаторов ВУЭОС-6-10 (рис. 1) [3], а также устройства для ЭОС низковольтных и высоковольтных электродвигателей (ЭД) УЭСИ-0,4, УЭОС-6-10 [4].

Экспериментально установлено, что при определенных параметрах электрического поля электроосмотическая сила, возникающая в микрокапиллярах, столь велика, что способна вытолкнуть влагу из глубинных слоев на поверхность твердой изоляции, находящейся в масле [2].

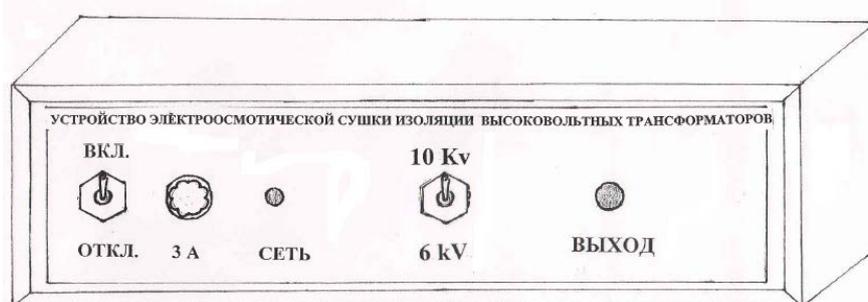


Рис. 1. Устройство электроосмотической сушки ВУЭОС-6-10

Конструкции систем изоляции трансформаторов в сравнении, например, с системой изоляции электродвигателей (ЭД) более сложны как геометрически, так и по разнообразию и количеству отдельных элементов. По этим причинам ЭОС изоляции трансформатора нередко протекает менее успешно в сравнении с ЭД. В связи с этим было принято решение смоделировать электрическое поле в трансформаторе при ЭОС изоляции активной части для нескольких вариантов подключения устройства ЭОС – ВУЭОС-6-10 с целью определения наиболее эффективного способа подключения.

В качестве примера рассмотрим три способа подключения ВУЭОС-6-10 к трансформатору ТМН-6300/35:

1. Положительный электрод подключаем к обмотке высокого напряжения (ВН), а отрицательный к корпусу (баку) трансформатора (рис. 2а);
2. Положительный электрод подключаем к обмотке низкого напряжения (НН), а отрицательный к баку (рис. 2б);
3. Положительный электрод подключаем к обмотке ВН и НН, а отрицательный к баку (рис. 2в).

Для моделирования электрического поля используем программный комплекс ELCUT, разработанный компанией ООО «ТОР». ELCUT – это современный программный комплекс, позволяющий моделировать

тепловые, электромагнитные и механические задачи методом конечных элементов (МКЭ). Основная идея МКЭ состоит в «разбиении рассматриваемой области на ряд подобластей (конечных элементов), в каждой из которых неизвестная величина (например напряжение) имеет простое аналитическое выражение. Эти конечные элементы имеют общие узловые точки, в которых они связаны между собой, и в совокупности аппроксимируют форму рассматриваемой области» (рис. 3) [8].

Для построения картины электрического поля рассматриваем трехфазный, двухобмоточный трансформатор ТМН-6300/35-У1, производства ООО «Тольяттинский трансформатор». Данный трансформатор класса 35 кВ, понижающий напряжение с 35 кВ до 6,3 кВ, предназначен для работы в сетях трехфазного переменного тока частотой 50 Гц. В трансформаторе применено естественное масляное охлаждение [6]. Активная часть трансформатора состоит из магнитопровода стержневого типа, непрерывных катушечных обмоток, продольной и главной изоляции. Подробно конструкция активной части рассмотрена в [7].

На рис. 7 показана построенная в программном комплексе ELCUT геометрическая модель активной части трансформатора ТМН-6300/35-У1.

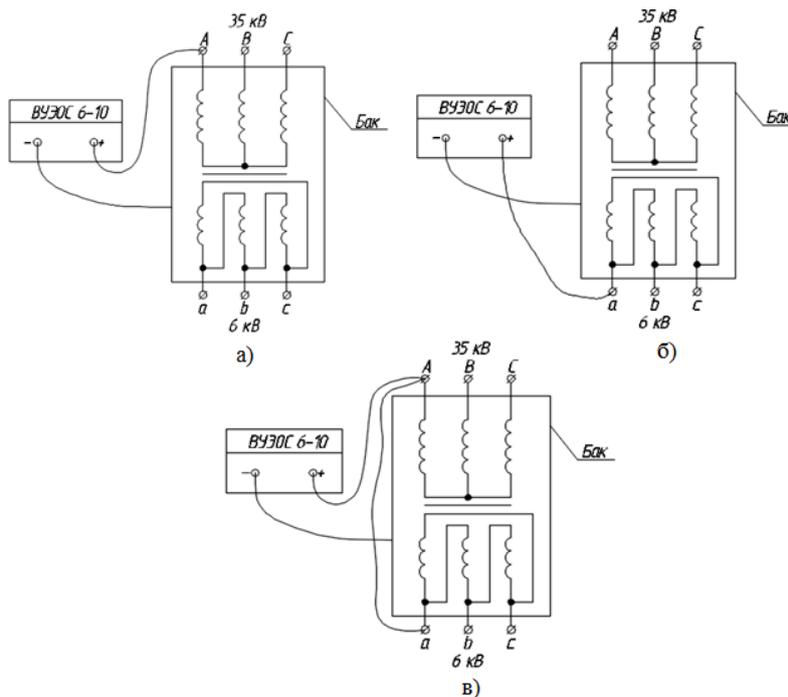


Рис. 2. Варианты подключения ВУЭОС-6-10 к трансформатору

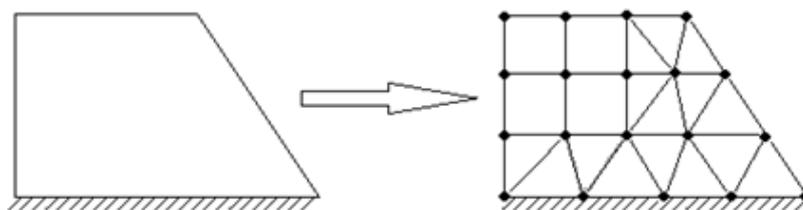


Рис. 3. Метод конечных элементов

Создание геометрической модели реализовано в три этапа:

- ввод геометрических объектов и манипулирование ими;
- задание источников поля, граничных условий и свойств сред;
- построение сетки конечных элементов.

Основными типами объектов в геометрической модели являются вершины, ребра и блоки.

Геометрическая модель активной части трансформатора ТМН-6300/35 состоит из следующих элементов:

1. Блоки: изолирующие трубки (бумажно-бакелитовые), кабельная бумага (КТ-50); электроизоляционный картон марки Б и БС; кабельная бумага

(КМП-120); трансформаторное масло; бумага электроизоляционная крепированная (ЭКТМ).

2. Ребра: бак, магнитопровод, обмотка ВН и НН фазы А, обмотка ВН и НН фазы В, обмотка ВН и НН фазы С, регулировочная обмотка фазы А, фазы В, фазы С.

Источники поля, граничные условия и свойства сред задаются с использованием привязывания меток, обладающих соответствующими свойствами, к геометрическим объектам.

В свойствах блоков задаются диэлектрическая проницаемость и электропроводность. На рис. 4 представлены свойства изолирующих трубок. Для остальных блоков параметры задаются аналогично, их значения представлены в таблице.

Таблица

Свойства блоков

Наименование блока	Диэлектрическая проницаемость	Электропроводность, см/м
Изолирующие трубки	3.8	$10^{-13}$
Кабельная бумага (КТ-50 и КМП-120)	2.3	$10^{-15}$
Бумага электроизоляционная крепированная (ЭКТМ)	2.3	$10^{-15}$
Электроизоляционный картон марки Б и БС	2.5	$10^{-11}$
Трансформаторное масло	2	$10^{-14}$

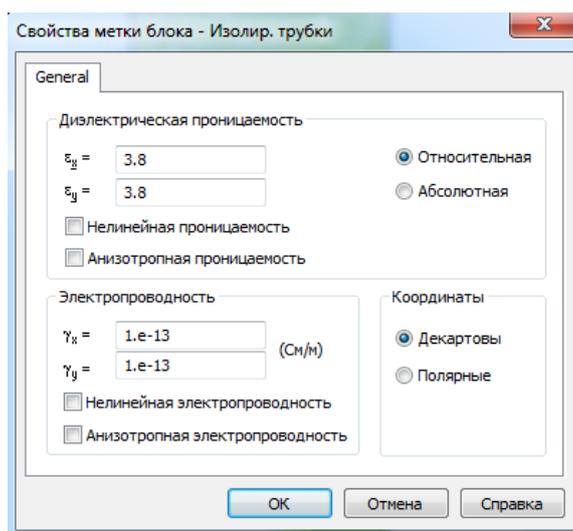


Рис. 4. Свойства метки блока

В свойствах ребер задается источник поля, а именно величина потенциала (рис. 5).

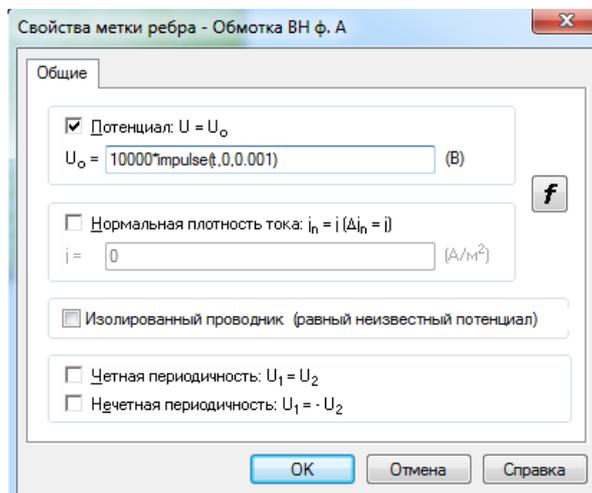


Рис. 5. Свойства метки ребра

ВУЭОС-6-10 выдает импульсный сигнал определенной формы, скважности, частоты и напряжения (рис. 6). Поэтому в свойствах ребер при задании значения потенциала прописывается функция импульса:

$$U = 10000 * \text{impulse}(t, t_1, t_2)$$

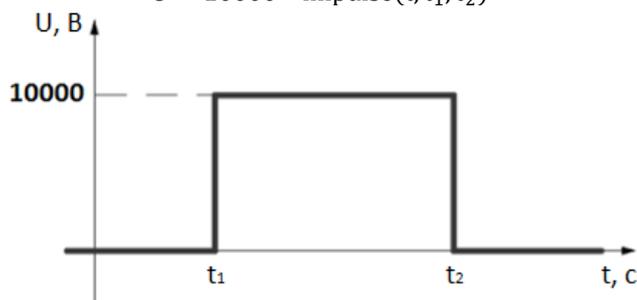


Рис. 6. Форма импульса ВУЭОС-6-10

Последним этапом в создании геометрической модели является построение сетки конечных элементов (рис. 7).

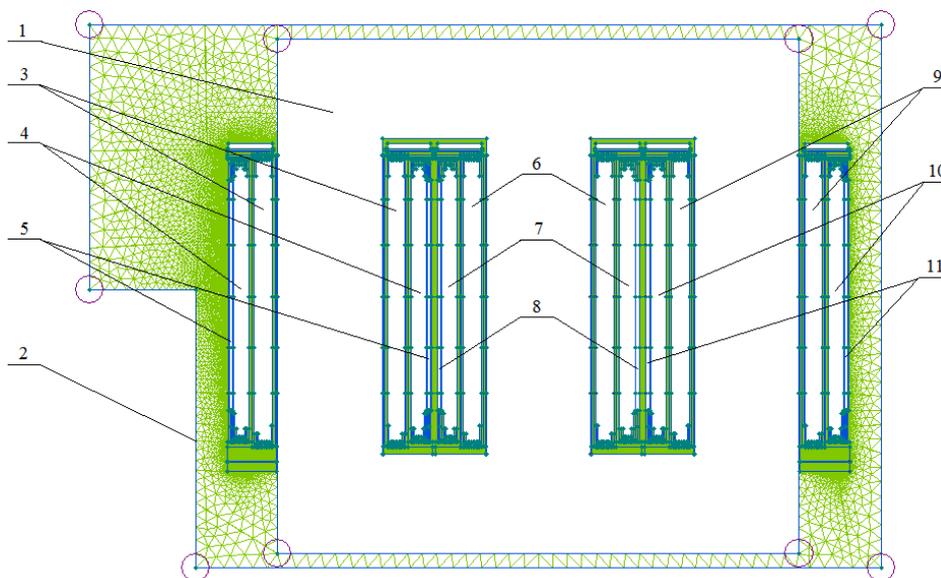


Рис. 7. Геометрическая модель активной части трансформатора ТМН-6300/35-У1:

- 1 – магнитопровод; 2 – бак трансформатора; 3 – обмотка НН фазы А;
- 4 – обмотка ВН фазы А; 5 – регулировочная обмотка фазы А; 6 – обмотка НН фазы В;
- 7 – обмотка ВН фазы В; 8 – регулировочная обмотка фазы В; 9 – обмотка НН фазы С;
- 10 – обмотка ВН фазы С; 11 – регулировочная обмотка фазы С

В результате моделирования получены картины электрического поля для трех вариантов подключения ВУЭОС-6-10 к трансформатору ТМН-6300/35-У1.

Для выявления наиболее эффективного способа подключения устройства ЭОС к трансформатору рассмотрены несколько элементов полученных вариантов картин напряженностей электрического поля (рис. 8).

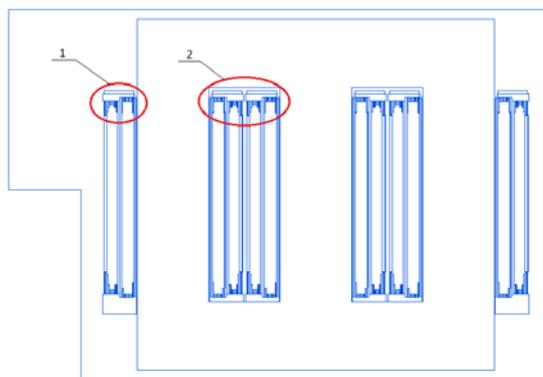


Рис. 8. Элементы конструкции активной части трансформатора ТМН-6300/35, рассмотренные при анализе картины напряженности электрического поля

На рис. 9 представлены результаты первого рассмотренного элемента, а на рис. 10 – второго.

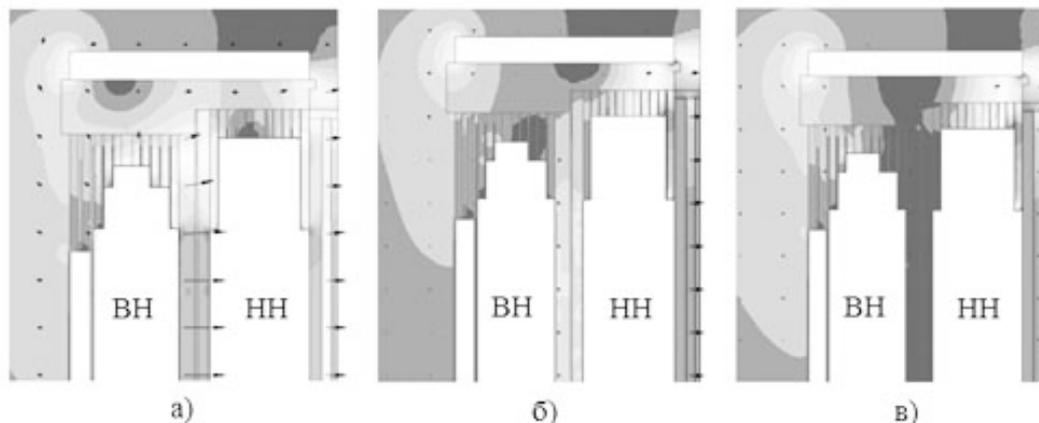


Рис. 9. Результаты первого рассмотренного элемента картины напряженности электрического поля при электроосмотической сушке изоляции ВУЭОС-6-10:  
 а – при подключении ВУЭОС-6-10 к обмотке ВН; б – при подключении ВУЭОС-6-10 к обмотке НН;  
 в – при подключении ВУЭОС-6-10 одновременно к обмотке ВН и НН

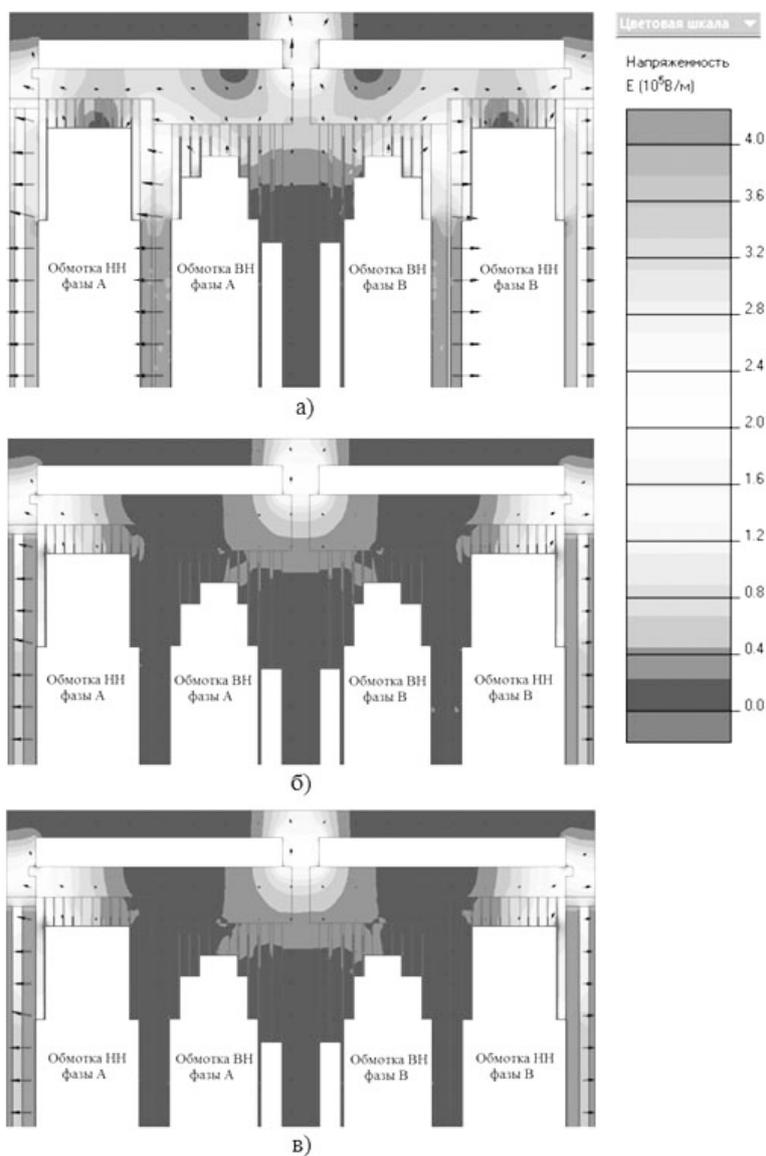


Рис. 10. Результаты второго рассмотренного элемента картины напряженности электрического поля при электроосмотической сушке изоляции ВУЭОС-6-10:  
 а – при подключении ВУЭОС-6-10 к обмотке ВН; б – при подключении ВУЭОС-6-10 к обмотке НН;  
 в – при подключении ВУЭОС-6-10 одновременно к обмотке ВН и НН

При подключении ВУЭОС-6-10 к обмотке НН (рис. 9б, рис. 10б) по цветовому распределению напряженности электрического поля ( $E$ ) видно, что интенсивность поля между обмоткой НН и магнитопроводом значительно выше, чем при подключении к обмотке ВН (рис. 9а, рис. 10а). Среднее значение  $E$  в данной области составляет  $6,5 \cdot 10^5$  В/м, что на 57 % больше, чем при подключении к обмотке ВН ( $E \approx 2,8 \cdot 10^5$  В/м). В остальных частях изоляции интенсивность электрического поля при подключении ВУЭОС-6-10 к обмотке НН существенно ниже. Интенсивность электрического поля в зоне межобмоточной изоляции значительно отличается. Так, среднее значение  $E$  в данной области составляет  $6 \cdot 10^4$  В/м, что на 80% меньше, чем при подключении к обмотке ВН ( $E \approx 29 \cdot 10^4$  В/м). Это объясняется тем, что обмотки в трансформаторе данного типа концентрические (обмотка НН расположена ближе к магнитопроводу). При подключении ВУЭОС-6-10 к обмотке ВН (рис. 2а) силовые линии электрического поля, направленные от проводника (обмотка ВН) с положительным потенциалом к проводнику с отрицательным потенциалом (бак и магнитопровод), пронизывают обмотку НН. В результате сушке подвергаются обе обмотки как обмотка ВН, так и обмотка НН, что значительно сокращает продолжительность сушки по сравнению с другими вариантами подключения устройства.

При использовании третьего способа подключения устройства сушки – одновременно к обмотке ВН и НН (рис. 2в) результаты аналогичны процессу сушки при подключении к обмотке НН (рис. 2б).

По результатам исследований можно сделать вывод, что наиболее эффективным из рассмотренных способов подключения устройства электроосмотической сушки ВУЭОС-6-10 к трансформатору с конструктивным исполнением схожим с ТМН-6300/35-У1 является вариант подключения к обмотке ВН (рис. 2а).

Полученные результаты позволили изменить технологию ЭОС трансформаторов и внести коррективы в инструкцию по эксплуатации устройства ВУЭОС-6-10.

1. Давиденко, И. В. Вопросы надежности и диагностики силовых трансформаторов низких классов напряжения / И. В. Давиденко, В. И. Комаров, А. А. Тихонов // Диагностика электрических установок: доклады третьей науч.-практ. конф. Общественного Совета специалистов Сибири и Востока по проблемам диагностики силового электрооборудования и аналитическим приборам для предприятий энергетики и опыте их применения. – Ангарск, 2008. – С. 46–52.

2. Немировский, А. Е. Особенности электроосмотического обезвоживания твердой изоляции маслонаполненных высоковольтных трансформаторов / А. Е. Немировский, Н. К. Мороз // Вестник Челябинского государственного агроинженерного университета. – 2003. – Т. 39. – С. 88–89.

3. Пат. 2174281 РФ, МПК H02K 15/12, H02K 15/00, H02F 41/02. Способ сушки твердой изоляции обмоток трансформатора в герметичном баке / Н. К. Мороз, А. Е. Немировский, К. П. Симаков, Т. А. Немировская. – № 2000132541/09; заявл. 26.12.2000; опубл. 27.09.2001. – 2001. – Бюл. № 27.

4. А. с. 1705972 СССР, МПК H02K 15/12. Способ сушки изоляции обмоток электрической машины / А. Е. Немировский, Н. К. Мороз, В. Г. Бугаков, А. В. Бусырев; заявитель Волог. политехн. ин-т. – № 4817924/07; заявл. 23.04.1990; опубл. 15.01.1992. – 1992. – Бюл. № 2.

5. Рыбаков, Л. М. Прогнозирование отказов и планирование резерва запасных элементов, аппаратов и оборудования распределительных электрических сетей 10 кВ / Л. М. Рыбаков, З. Г. Иванова // Вестник Чувашского университета. – 2015. – № 1. – С. 104–110.

6. Техническая информация. Трансформаторы масляные силовые ТМ, ТМН [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://electroshield.nt-rt.ru/images/manuals/tmn.pdf>.

7. Усков, Я. А. Анализ конструкции изоляции активной части трехфазного трансформатора / Я. А. Усков; науч. рук. А. Е. Немировский // Материалы межрегиональной научной конференции XI ежегодной научной сессии аспирантов и молодых ученых: [в. 3 т.]. Т. 1 / ВоГУ. – Вологда, 2017. – С. 143–147.

8. Шевченко, С. Ю. Анализ методов расчета электрических полей установок высоких напряжений / С. Ю. Шевченко, А. А. Окунь // Электротехника и электромеханика. – 2010. – № 4. – С. 59–62.

Y.A. Uskov, A.E. Nemirovsky, V.O. Politsyna

#### OPTIMIZATION OF THE ELECTROSMOTIC DRYING DEVICE CONNECTION TO THE TRANSFORMER FOR ISOLATION DEHYDRATION

The article deals with not thermal way of isolation drying of high-voltage oil transformers active part. Process of modeling of electric field in the program ELCUT complex on the example of the three-phase transformer is described. The most effective way of the electroosmotic drying device connection to the transformer is defined.

Electroosmotic drying, transformer, isolation of an active part, electric field, finite element method, ELCUT.