

## ОСОБЕННОСТИ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ОБМОТКАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА НАДЕЖНОСТЬ

Конохов Н.Н., к.т.н., доц.

Донецкий институт железнодорожного транспорта

Украина, 83018, Донецк, ул. Горная, 6, ДонИЖД, кафедра "ЕСЕ"

тел.(0622) 51-28-30

*Розглянуті та узагальнені закономірності електричного старіння та концентрації напруженості електричного поля (КНЭП) у корпусній ізоляції електричних машин (ЕМ). Вказано на вплив КНЭП і конструктивних особливостей жорстких обмоток ЕМ на надійність їх ізоляції. Розглянуті відомі (класичні) та новий, розроблений автором, більш простий та технологічний засіб зниження місцевих перенапруг в ізоляції середніх та великих ЕМ.*

*Рассмотрены и обобщены закономерности электрического старения и концентрации напряженности электрического поля (КНЭП) в корпусной изоляции электрических машин (ЭМ). Показано влияние КНЭП и конструктивных особенностей жестких обмоток ЭМ на надежность их изоляции. Рассмотрены известные (классические) и новый, разработанный автором, более простой и технологичный способ снижения местных перенапряжений в изоляции средних и крупных ЭМ.*

### ВВЕДЕНИЕ

Теоретические вопросы, связанные с влиянием КНЭП на надежность работы изоляции ЭМ, исходя из особенностей конструкции их обмоток, изучены и освещены в литературе недостаточно и фрагментарно. При отсутствии специальной публикации, посвященной данному вопросу, это часто приводит к тому, что ученые и разработчики новых систем изоляции и конструкций обмоток ЭМ не делают всесторонний анализ физических процессов, связанных с явлением КНЭП в обмотках ЭМ, и не могут поэтому дать теоретическое объяснение отдельных результатов исследований или сделать полный анализ новых своих предложений. Объяснения результатов некоторых из таких работ [3, 10, 12] или анализ сделанных в них выводов целесообразно рассмотреть, исходя из теоретических положений данной статьи по мере изложения ее материала.

### ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СТАРЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ЭМ И УЧЕТ ВЛИЯНИЯ КНЭП НА НАДЕЖНОСТЬ ЖЕСТКИХ ОБМОТОК

По современным воззрениям [1, 2, 3] электрическое старение новой изоляции происходит весьма медленно и лишь постепенно ускоряется по мере развития общего разрушения, вызванного процессами теплового, механического или иного характера, последующего разрастания микродефектов и газовых включений и т. д.

Пробой изоляции при этом носит ионизационный характер, т.е. обусловлен постепенным разрушением изоляции частичными разрядами, происходящими в ее структурных неоднородностях. Протекание процесса старения, таким образом, происходит во всем объеме диэлектрика, но разрушение носит локальный характер. Скорость разрушения изоляции определяется скоростью деструкции органического связующего изоляции, а путь пробоя - наличием слабых мест в слюдяных барьерах.

Влияние электрического поля на надежность работы изоляции исследовано еще недостаточно. Наибо-

лее изучена для изоляции ЭМ зависимость времени  $t$  до пробоя от напряженности электрического поля  $E$ , которую принято называть "кривой жизни" изоляции [1]:

$$t = A_e \cdot E^{-m} \quad \text{или} \quad \lg t = \lg A_e - m \cdot \lg E \quad (1)$$

где  $A_e$  и  $m$  - коэффициент и показатель степени, зависящие от свойств изоляционного материала и типа изоляции.

Специфика электрического старения состоит также в сопутствующем действии электрического поля процессу протекания в изоляции химических реакций. Однако наблюдение внешних признаков протекания химических реакций в изоляции (образование новых химических соединений в виде газов) получены при имевших место частичных разрядах [1, 4]. Протекание же химических реакций в изоляции под действием электрического поля при отсутствии частичных разрядов пока достоверно не установлено. В [4] дается следующая физическая модель этого процесса: при действии электрического поля перестройка связи в диэлектрике сопровождается освобождением не всей энергии связи, а только ее части, определяемой энергиями активации протекающих реакций, характер которых зависит, в частности, и от среды, в которой происходит старение.

Почти во всех рассмотренных работах имеются указания на то, что при концентрации напряженности процессы электрического старения и разрушения изоляции усугубляются. Однако эти указания имеют очень общий характер. Так, в [1] лишь указывается, что в пустотах изоляции частичные разряды возникают особенно при перенапряжениях. В [3] показано, что при напряжении порядка 10 кВ у обмоток, работающих в воздушной среде, в течении уже небольшого времени наблюдались следы ионизационного старения во внутренних слоях изоляции близ углов поперечного сечения стержня, где, как будет показано ниже, имеет место КНЭП. В [4], при построении физической модели старения изоляции на основе двух независимых процессов термофлуктуационной пере-

стройки связей и их разрушения под действием частичных разрядов, вклад КНЭП в ускорение процесса старения учитывается через введение эффективной напряженности электрического поля  $k_0 \cdot E$ , где  $k_0$  – коэффициент концентрации поля структурными неоднородностями. Таким образом, влияние концентрации электрического поля здесь рассматривается только на микроструктурном уровне, который характеризует изоляцию лишь со стороны технологического несовершенства самой изоляции.

Поэтому вопрос о КНЭП в обмотках ЭМ в связи с особенностями уже конструкции самих обмоток и влияния этих особенностей на ресурс изоляции ЭМ требуют специального рассмотрения.

### ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ КНЭП В ИЗОЛЯЦИИ ЭМ

Для жестких катушек с прямоугольным поперечным сечением стержней, которые применяются в обмотках средних и крупных ЭМ, характерным является неравномерное распределение электрического поля по периметру корпусной изоляции.

Поле на плоских участках такого периметра можно рассматривать как однородное поле в плоском конденсаторе, а на скругленных участках – как неоднородное поле в цилиндрическом конденсаторе [5], (рис. 1):

$$E = \frac{U}{d} \text{ - для плоско – параллельного поля} \quad (2)$$

$$E_r = \frac{U}{r \cdot \ln \frac{r_1}{r_0}} \text{ - для цилиндрического поля} \quad (3)$$

Тогда максимальная напряженность в цилиндрической части изоляции обмотки ЭМ будет при  $r = r_0$  равна:

$$E_{\max} = \frac{U}{r_0 \cdot \ln \frac{r_1}{r_0}} = \frac{U}{r_0 \cdot \ln \left( \frac{r_0 + d}{r_0} \right)} \quad (4)$$

Формула (4) математически объясняет, почему описанное в [3] разрушение высоковольтной изоляции, происходящее на углах стержней катушки, вначале обнаруживается на внутреннем слое изоляции, прилегающем к проводнику: наибольшее напряжение испытывает именно этот слой на радиусе  $r_0$  (рис. 1).

В работе [6], посвященной рассматриваемому вопросу, предложена зависимость (5) для определения относительного превышения максимальной напряженности в цилиндрической части изоляции по сравнению с плоской частью той же изоляции обмотки. Такую зависимость можно получить из отношения (4) к (2):

$$\frac{E_{\max}}{E} = \frac{d}{r_0 \cdot \ln \left( \frac{r_0 + d}{r_0} \right)} \quad (5)$$

Эта зависимость иллюстрируется также графически (рис. 2), как функция  $\frac{E_{\max}}{E}$  от двух переменных параметров  $d$  (толщина изоляции) и  $r_0$  (радиус закругления углов проводника):

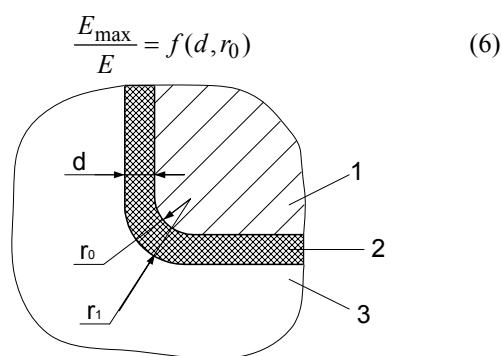


Рис. 1. Конструкция корпусной изоляции жесткой обмотки: 1 - проводник, 2 - корпусная изоляция, 3 - магнитопровод

Из рис.2 можно заключить, что концентрацией напряженности на углах катушек можно управлять в основном через параметр  $r_0$ , так как  $d$  (толщина изоляции) меньше принятых значений уменьшена быть не может.

В этой же работе [6] рассматривается влияние соотношения сторон проводников на степень концентрации поля на углах поперечного сечения проводников. Так, измерения на модели проводника с радиусом закругления углов  $r_0 = 1$  мм показало, что при соотношении сторон  $h/b = 5/1$  напряженность поля  $E_{\max} = 1,82 \cdot E$ , а при соотношении  $h/b = 1/1$  (квадрат) напряженность поля  $E_{\max} = 2,08 \cdot E$ . Иными словами, для соотношения сторон  $h/b = 1/1$  напряженность поля на участке углов была на 15% выше, чем аналогичная напряженность поля проводника с соотношением сторон  $h/b = 5/1$ . Кроме этого приводятся результаты сравнительных испытаний на пробой в течении 1 мин образцов катушек из двух партий с однотипной 2-х миллиметровой слюдяной изоляцией, отличающихся лишь соотношением  $h/b$ : в одном случае 5/1, в другом 2/1. График распределения пробивной напряженности показывает смещение его в сторону увеличения срока службы при более низком соотношении сторон. Однако в работе [6] не дается никакого физического объяснения установленному влиянию соотношения сторон на степень концентрации поля на углах прямоугольных проводников. Отсутствует также конструктивное описание экспериментальной части (в частности формы наружного электрода). Поэтому в дальнейшем этот вопрос требует дополнительной проверки и теоретического объяснения.

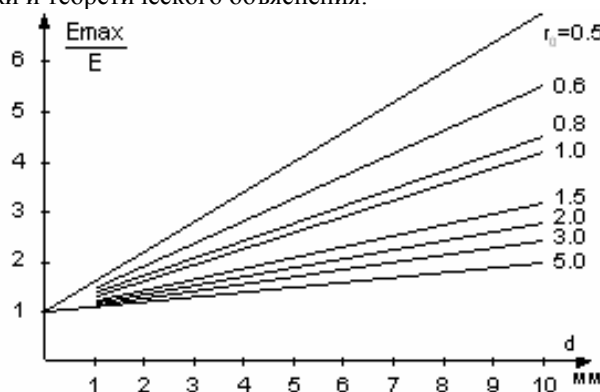


Рис. 2. Расчетные зависимости относительных превышений напряженности для различных радиусов скругления проводника в функции от толщины изоляции

На основании результатов расчета [7] можно судить еще и о неравномерном распределении напряженности электрического поля по высоте паза, заполненного многослойной обмоткой из прямоугольных проводников. Напряженность является непрерывной функцией от глубины паза, возрастающей от нижних проводников на дне паза к верхним проводникам у его шлица (рис. 3). Причем неравномерность распределения возрастает с увеличением частоты.

Это объясняют тем, что распределение напряженности электрического поля  $E_y(z)$ , которая равна произведению распределения плотности тока  $I_y$  на удельное сопротивление  $\Delta \cdot E_y(z) = \Delta \cdot i_y(z)$ , не отличается от распределения плотности тока  $I_y(z)$  (рис. 3), обусловленного скин-эффектом. При частоте тока 50 Гц напряженность в верхней части паза в 1,5-2 раза больше, чем в нижней. Поэтому изоляция катушек, находящихся в верхней части паза, должна испытывать дополнительно 1,5-2 кратное перенапряжение.

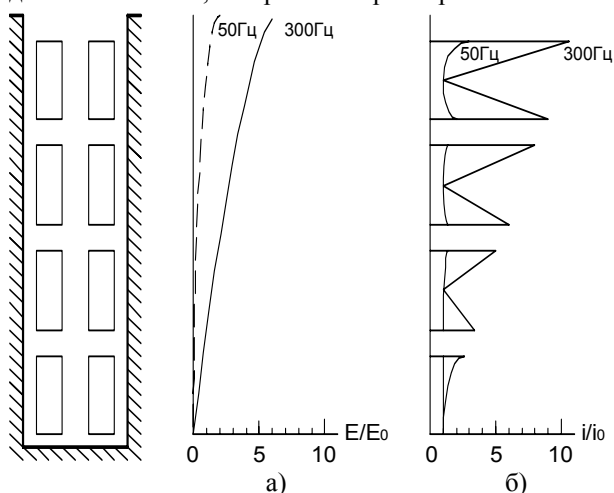


Рис. 3. Распределение напряженности электрического поля (а) и плотности тока (б) по высоте прямоугольного паза

Обобщая влияние рассмотренных конструктивных факторов на концентрацию напряженности в корпусной изоляции обмоток можно сделать вывод, что наибольшая КНЭП имеет место на угловых участках поперечного сечения катушек. Например, при односторонней толщине изоляции  $d=2$  мм и радиусе закругления углов проводника  $r_0=0,5$  мм имеет место 2,5-кратное перенапряжение (рис. 2). С учетом же неравномерного распределения напряженности по высоте паза угловая изоляция верхнего стержня катушки может иметь 4-5-кратное перенапряжение. Если же учесть, что на постоянно действующие указанные конструктивные перенапряжения в изоляции обмоток периодически (при включениях, отключениях и реверсах) кратковременно накладываются коммутационные перенапряжения, которые в низковольтных ЭМ могут иметь 1,5-2,5 кратность [8], а в высоковольтных ЭМ достигать  $7,8 \sqrt{\frac{2}{3}} U_H$  [9], то местные периодические перенапряжения в отдельных "слабых" местах изоляции могут достигать 10-30 кратных значений.

## ПРИМЕРЫ АНАЛИЗА КОНСТРУКЦИЙ ЭМ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ИЗОЛЯЦИИ С УЧЕТОМ КНЭП

Выше описанная картина перенапряженности в изоляции высоковольтных ЭМ позволяет критически пересмотреть предложения работы [10] в отношении "прощения" (уточнения) витковой и корпусной изоляции новых двигателей типа ВАО2. Предложение основывается на данных работы [11], где показано, что наибольшему воздействию волновых перенапряжений подвергаются первые 5-6 катушек фазы. Поэтому в [10] предлагается в остальных 12-16 катушках фазы толщину изоляции уменьшить. Ошибочность такого решения состоит в том, что оно учитывает только последний из всех рассмотренных выше факторов повышения напряженности электрического поля в изоляции крупных ЭМ. Это тем более ошибочно, т.к. факторы, связанные с конструктивной КНЭП, действуют постоянно, а фактор коммутационной перенапряженности - только кратковременно, при переходных процессах.

Обратимся теперь к анализу результатов исследований высоковольтной (В/В) изоляции статорных обмоток на основе новых слюдопластовых лент в работе [12]. Были получены следующие результаты сравнительных ускоренных испытаний макетов В/В обмоток ЭМ и сухих трансформаторов (ТР), изготовленных на основе слюдинитовых и слюдопластовых лент:

Теоретический\* ресурс изоляции, лет

Тип изоляции	Ресурс на макетах обмоток ЭМ	Ресурс на макетах обмоток ТР
Слюдинитовая	39	43
Слюдопластовая	85	125

\* Термин "теоретический ресурс" примененный авторами в работе [12], следует считать неудачным. В данном случае больше подошел бы термин "электростатический ресурс" так как ресурсные испытания носили однофакторный характер и не учитывали влияние на ресурс изоляции электродинамического, теплового и механического факторов.

При анализе полученных результатов авторы обращают внимание на то, что для слюдинитовой изоляции ресурсы изоляции обмоток ЭМ и ТР примерно одинаковы, а для новой слюдопластовой изоляции ресурс обмотки ЭМ примерно в 1,5 раза меньше ресурса такой же изоляции обмотки ТР. Авторы высказывают предположение, что это связано с разными технологическими свойствами лент, с разной их повреждаемостью на углах катушек при намотке ленты.

Такое объяснение неубедительно потому, что В/В катушки ЭМ и ТР наматываются из однотипных проводов, у которых радиусы скруглений углов на проводниках примерно одинаковы и повреждаемость на углах при намотке разных изоляционных лент тоже должна быть примерно одинакова. Если же посмотреть на результаты ресурсных испытаний обмоток ЭМ с учетом влияния на их надежность конструктивной КНЭП, которая не имеет такого места в обмотках ТР, то можно дать следующее объяснение полученных результатов. В исследуемой изоляции, как указывают авторы со ссылкой на [13], реализуется второй

механизм электрического старения, характерный для области сильно неоднородных полей в изоляции с развитием в ней частичных разрядов. Но в теоретической части данной статьи было показано, что наиболее неоднородное поле, обусловленное конструктивной КНЭП, находится на углах поперечного сечения обмоток ЭМ. Поэтому при применении новых слюдопластовых лент, имеющих значительно более высокие показатели электрической прочности, чем слюдинитовая лента (коэффициент  $A_e$  в формуле (1), зависящий от свойств изоляционного материала, у макетов обмоток ЭМ с новой и старой лентой соответственно был равен  $A_{ЭМ}^{нов} = 2,37$  и  $A_{ЭМ}^{стар} = 1,66$ ) влияние КНЭП на снижение ресурса изоляции ЭМ по сравнению с ресурсом изоляции обмоток ТР оказалось более существенным (для ЭМ - 85 лет, для ТР- 125 лет), чем при использовании изоляции из старой слюдопластовой ленты, для которой  $A_{ЭМ}^{стар} = 1,66$ ,  $A_{ТР}^{стар} = 1,68$ . В последнем случае ресурс старой изоляции для ЭМ составил 39 лет, а для ТР - 43 года.

Следует также заметить, что реальные значения ресурсов новых обмоток ЭМ и ТР будут иметь не только другие значения по сравнению с полученными (теоретическими\*), как справедливо указывают на это сами авторы в [10], но и другие соотношения  $A_{ЭМ}^{нов}$  и  $A_{ТР}^{нов}$ . В подтверждение этого можно сослаться на результаты многофакторных ускоренных испытаний ЭМ со спецпазами [14], которые показали, что углы жестких обмоток ЭМ являются "слабыми" местами не только в отношении электрической, но и в отношении механической нагрузки.

#### КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ СНИЖЕНИЯ КНЭП В ИЗОЛЯЦИИ ЖЕСТКИХ ОБМОТОК ЭМ

Для снижения КНЭП и повышения надежности жестких обмоток ЭМ известны зарубежная [6] и отечественная [3] специальные конструкции. В первой из них корпусная часть проводников катушки помещается в специальный внутренний электрод, имеющий логарифмический профиль поперечного сечения в зоне углов. Координаты такого профиля вблизи углов описываются в [6] функцией (7), когда расстояние между электродами, вдоль прямых боковых сторон, принимается равным  $\pi$ .

$$\begin{cases} x = -2 \cdot \ln \operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{2} + \frac{\psi}{2} \right) \\ y = -2 \cdot \ln \operatorname{tg} \left( \frac{\psi}{2} \right) \end{cases} \quad (7)$$

Условием, из которого определен логарифмический профиль внутреннего электрода, получивший название "идеальный профиль Борда", является условие не превышения напряженности на углах катушек над напряженностью в однородном поле их плоских частей. На рис. 4 приведены из [6] кривые жизни образцов катушек с профилем Борда и аналогичных образцов катушек прямоугольного профиля с радиусом

округления углов проводников  $r_0 = 1$  мм.

Во второй, отечественной конструкции, внутренний электрод имеет упрощенную форму (рис. 5): желобообразная полоса из фольги, которая помещается под корпусной изоляцией лишь на крайние, угловые проводники секций.

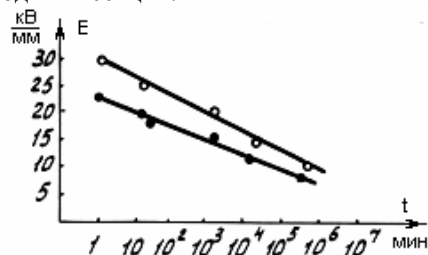


Рис. 4. Кривые жизни слюдяной изоляции с эпоксидным связующим при толщине  $d = 3$  мм и частоте  $f = 50$  Гц для двух типов профиля внутреннего электрода:

- - для профиля Борда;
- - для традиционного профиля.

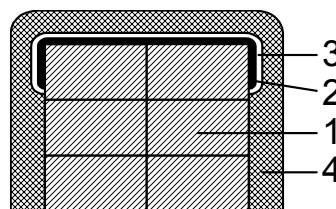


Рис. 5. Конструкция стержневой обмотки НПО "Электротяжмаш" [3]:

- 1 - проводник; 2 - стеклотекстолитовая прокладка с округленными углами; 3 - алюминиевая фольга;
- 4 - корпусная терморезистивная изоляция

Для необходимой жесткости и хорошего скругления углов под электрод из фольги подкладывают еще специальную, необходимым образом округленную, стеклотекстолитовую прокладку. В этом случае концентрация электрического поля на углах катушек уменьшается в такой же степени, в какой радиус скругления углов желобообразного электрода больше радиуса скругления углов проводника – в соответствии с формулой (5). Однако из-за большой сложности изготовления и уменьшения коэффициента заполнения паза медью профиль Борда в электрических машинах не применяется вообще, а конструкция по рис. 5 применяется только в предельно крупных и дорогостоящих электрических машинах – турбогенераторах мощностью свыше 500 МВт [15].

#### АВТОРСКОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ СНИЖЕНИЯ КНЭП В ИЗОЛЯЦИИ ЖЕСТКИХ ОБМОТОК ЭМ СО СПЕЦИАЛЬНЫМ ПРОФИЛЕМ ПАЗОВ

Более практичным и технологичным конструктивным решением задачи снижения КНЭП по сравнению с известными решениями [3] и [6] является авторская конструкция по патенту РФ [16]. Теоретическое обоснование этой конструкции базируется на законе "кривизны" и "методе регулирования полей" [17] и получено из аналогии физической модели электрического поля цилиндрического конденсатора с двухслойным диэлектриком [5] с физической моделью угловых зон прямоугольных катушек ЭМ, расположенных в магнитопроводе со специальным профилем паза.

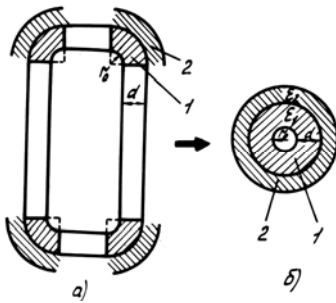


Рис.6. Эквивалентность конструкции угловых зон катушки с дополнительным внешним изоляционным слоем (а) и конструкции двухслойного конденсатора (б):  
1 – внутренний слой изоляции; 2 – внешний слой изоляции;  
d – толщина внутреннего слоя изоляции

Математически напряженность электрического поля в изоляционных слоях 1 и 2 описывается уравнениями [5]:

$$E_1 = \frac{U}{r \cdot \left( \ln \frac{r_1}{r_0} + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} \right)} \quad \text{- для внутреннего слоя при } r_0 < r < r_1 \quad (8)$$

$$E_2 = \frac{U}{r \cdot \left( \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \cdot \ln \frac{r_1}{r_0} + \ln \frac{r_2}{r_1} \right)} \quad \text{- для внутреннего слоя при } r_1 < r < r_2 \quad (9)$$

Автором предложено выражение конструктивно-геометрического размера  $\Delta r = f(r_0, d, \varepsilon_1, \varepsilon_2)$  для расчета новой конструкции со специальным профилем паза также является предметом изобретения [16]:

$$\Delta r \approx (r_0 + d) \left[ \left( \frac{r_0}{r_0 + d} \cdot e^{\frac{d}{r_0}} \right)^{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}} - 1 \right] \quad (10)$$

Общий вид новой конструкции со специальным профилем паза [16] для повышения надежности корпусной изоляции обмотки ЭМ представлен на рис. 7. Данные об исследованиях этой конструкции и ее эффективности [18] из-за значительного объема статьи здесь не рассматриваются.

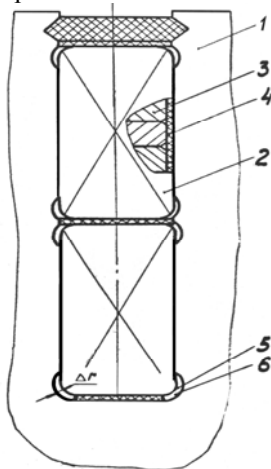


Рис. 7. Конструкция обмотки, расположенной в магнитопроводе со специальным профилем паза [16]  
1 – магнитопровод, 2 – катушка обмотки, 3 – проводник,  
4 – корпусная изоляция, 5 – углы катушек, 6 – сегментный зазор между углами катушек и магнитопроводом

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ермолин Н.П., Жерихин И.П. Надежность электрических машин. - Л.: Энергия, 1976.
- [2] Житомирский А.А. Исследование высоковольтной изоляции крупных электрических машин в условиях, приближенных к эксплуатационным // Автореферат дис. канд. техн. наук. - Л., 1980.
- [3] Кулаковский В.Б. Работа изоляции в генераторах. М.: Энергоиздат, 1981, 255 с.
- [4] Быков В.М., Большаков Л.П., Бережанский В.С. Физическая модель старения диэлектриков // В сб.: Вопросы надежности и исследования электромагнитных, тепловых и механических процессов в электрических машинах. - Л. – 1981, С. 205–213.
- [5] Говорков В.А. Электрические и магнитные поля. М.: Энергия, 1968.
- [6] Wichmann A. Gruenewald P. Influence of dielectric stress concentration on voltage endurance of epoxy-mica generator insulation.- Conf. Rec. 1976, IEEE Int. Symp. Elec. Insul., Montreal-Quebec, 1976. New York, 1976 p. 88-92 (англ.).
- [7] Yoschida K., Namada H. Напряженность электрического и магнитного полей и плотность тока в прямоугольных проводниках многослойных секций, уложенных в открытых пазах.- Кюсю дайгаку кагаку сюхо. Technol. Repts. Kyuchu Univ., 1978, 51, №4, 489-496 (япон.).
- [8] Реуцкий Н.А. Механизм возникновения перенапряжений при отключении низковольтных короткозамкнутых двигателей // Электромашиностроение и электрооборудование., 1977, №25, С. 83-87.
- [9] Похолков Ю.П. Исследование коммутационных перенапряжений в обмотках асинхронных двигателей // Изв. Томского политехнического института. 1972, т. 229, С. 53-58.
- [10] Ширнин И.Г. Совершенствование взрывозащищенных асинхронных двигателей мощностью 200-1000 кВт // Взрывозащищенное электрооборудование. Сб. науч. тр. УкрНИИВЭ, Донецк, 2000, -С. 4-7.
- [11] Каганов З.Г. Волновые напряжения в электрических машинах. - М.: Энергия, 1970, -208 с.
- [12] Пак В.М., Степанович А.П., Шамрай В.М., Федоров Л.Н. Новая слюдопластовая лента для изоляции статорных обмоток электрических машин и трансформаторов // Электротехника, 1997, №5. С. 9-13.
- [13] Кристинский Г.С., Федоров В.С., Шилин О.В. Вопросы надежности изоляционных систем // Тезисы докладов к Всесоюзному семинару по изоляции электрических машин. Томск, 1978. С. 29-30.
- [14] Главный В.Д., Збарский Л.А., Конохов Н.Н. Повышение надежности электродвигателей для стационарных установок на шахтах. // Уголь Украины. – 1985, №4, С. 23-24.
- [15] Турбогенераторы 500 и 800 МВт/Н.Г. Гринченко, Г.П. Езовит, В.С. Кильдишев и др. Киев: Техника, 1977.-140 с.
- [16] Патент РФ № 1377962. Магнитопровод электрической машины. // Н.Н. Конохов, Л.А. Збарский, В.Д. Главный. 30.06.1993
- [17] Кучинский Г.С., Кизеветтер В.Е., Пинталь Ю.С. Изоляция установок высокого напряжения. М.: Энергоатомиздат, 1987, -368 с.
- [18] Конохов Н.Н. Исследование и совершенствование элементов конструкции взрывозащищенных электродвигателей мощностью 200 – 2000 кВт. // Автореферат дис. канд. техн. наук. –Харьков, 1989.

Поступила 14.09.2005