

УДК 621.386.1 : 621.3.027.7

С. И. Мирошниченко, д-р техн. наук, проф.,
Ю. А. Щиголев, асп.

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ГЕНЕРАТОРА РЕНТГЕНОДИАГНОСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Научно-производственное объединение «Телеоптик», e-mail: ysch@teleoptic-pra.com.ua

Описана электрическая модель главной изоляции высоковольтного трансформатора, входящего в состав генератора рентгенодиагностической системы. Проведены расчёты напряжённости электрического поля в деталях конструкции. В ходе экспериментальных исследований электрической прочности выявлены признаки пробоя, которые подтверждают теоретические выводы.

Введение. Цифровые методы получения и хранения рентгеновских изображений широко используются в настоящее время в медицинской рентгенологии и во многих областях вытесняют традиционные приёмы с использованием рентгеновской плёнки [1]. Значительный прогресс в этой области обусловлен также и новыми возможностями, которые предоставляют цифровые рентгенодиагностические комплексы. Наряду со снижением дозовой нагрузки на пациента такие системы обеспечивают короткое время сбора данных об изображении, которые могут составлять несколько миллисекунд. Это позволяет за время одного рентгеновского исследования произвести серию экспозиций с различными параметрами, осуществляя, например, компоновку спектра зондирующего излучения. Задача реализации таких методов предъявляет более жёсткие требования к быстродействию высоковольтного генератора рентгенодиагностической системы, основным элементом которого является трансформатор высокого напряжения (ТВН). Стремление гарантировать отсутствие пробоя при разработке ТВН зачастую приводит к завышенным изоляционным промежуткам в его конструкции. При этом возрастает индуктивность рассеяния трансформатора, длительность переходных процессов и соответственно снижается его КПД. Поэтому являются актуальными методики разработки, которые обеспечивают заданную электрическую прочность и в то же время предотвращают от необоснованного завышения изоляционных промежутков.

Постановка задачи. Построение модели электрической прочности ТВН и её экспериментальная проверка являются содержанием настоящей работы.

Электрическая модель изоляции. Наиболее распространённое структурное построение высокочастотных рентгеновских питающих устройств – это импульсный источник постоянного высокого напряжения на основе трансформатора стержневой конструкции, который содержит несколько одинаковых вторичных обмоток [2; 3]. В данной работе рассматривался ТВН, у которого каждая из вторичных обмоток подключена к отдельному удвоителю напряжения. Выходы удвоителей соединены между собой последовательно. Достоинство такой архитектуры в том, что в области максимальной напряжённости электрического поля переменная составляющая этого поля оказывается меньше постоянной на величину, равную удвоенному количеству каскадов [2]. Таким образом, при расчётах изоляции можно пренебречь эффектами, связанными с переменным напряжением.

Часть конструкции ТВН, которая подвергается воздействию испытательного напряжения (главная изоляция) показана на рис. 1.

Траектории, вдоль которых развивается пробой, складываются из объёмных и поверхностных участков материалов деталей конструкции. Если вдоль силовых линий электрического поля выбрать канал с поперечным сечением, в пределах которого напряжённость поля можно считать постоянной, то изоляцию можно представить как

многослойную ёмкость [5; 6]. Некоторые из элементов такого ёмкостного делителя будут шунтироваться поверхностными сопротивлениями утечек.

На рис. 1 буквами обозначены элементы эквивалентной схемы, рассматриваемой конструкции:

- удельные ёмкости масляных промежутков: $C_{м1}$, $C_{м2}$, $C_{м3}$, $C_{м4}$;
- удельные ёмкости деталей конструкции: $C_{ПБ}$ – стенки плоского барьера (ПБ); $C_{ЦБ}$ – стенки цилиндрического барьера (ЦБ); C_p – верхнего ребра катушки со вторичной обмоткой (ВК); C_k – стенки ВК; C_3 – слоя изоляции экрана первичной обмотки;
- удельные сопротивления поверхностных утечек: R_{n1} , R_{n2} , R_{n3} , R_{n4} .

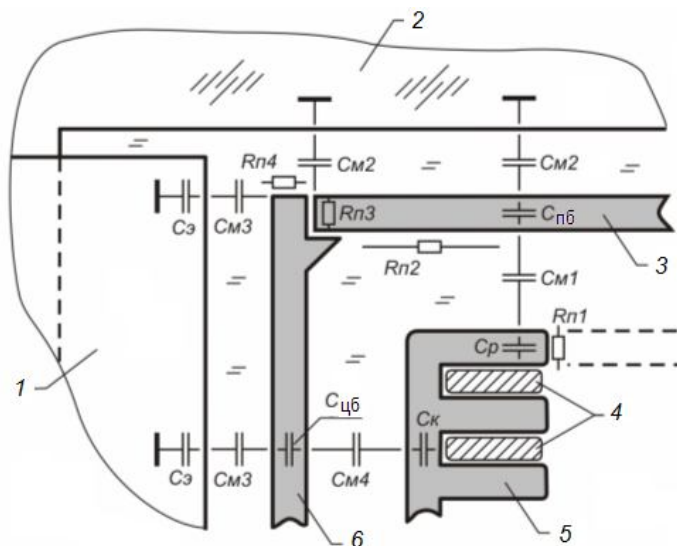


Рис. 1. Детали конструкции ТВН в области с максимальной напряжённостью электрического поля:

- 1 – катушка с первичной обмоткой и заземлённым экраном; 2 – ярмо магнитопровода;
- 3 – плоский барьер; 4 – секции вторичной обмотки; 5 – секционированная катушка со вторичной обмоткой; 6 – цилиндрический барьер

Кроме указанных элементов, необходимо также учесть удельную ёмкость изоляции провода вторичной обмотки – C_n .

Пунктирной линией на рисунке показан вариант ВК, у которой верхнее ребро выполнено удлиненным. Это значительно увеличивает суммарную длину поверхностных участков изоляции в направлении ярма магнитопровода. Если обеспечить достаточный запас по длине поверхностных участков, то сопротивления R_{n1} , R_{n2} , R_{n3} , R_{n4} можно исключить из эквивалентной схемы.

Изоляция выдержит генерируемое в секциях 4 напряжение, если к каждому из участков изоляции будет приложено напряжение, не превышающее его электрическую прочность. В случае пробоя одного из звеньев последовательной цепочки (возникновения частичного разряда) может возникнуть перегрузка по напряжению на другом звене, и как следствие произойдет сквозной пробой всей изоляции. Поэтому для надёжной работы изоляции необходимо обеспечить такое распределение напряжений по её элементам, которое бы согласовывалось с электрическими прочностями соответствующих участков.

Рассмотрим плоский многослойный пакет из n слоёв различных диэлектриков, к которому приложено напряжение $U_{\max}$. Напряжённость электрического поля внутри диэлектрика j -го слоя описывается формулой [5; 6]:

$$E_j = U_{\max} \left/ \varepsilon_j \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\varepsilon_i} \right., \quad (1)$$

где d_j – толщина j -го слоя; ε_j – его относительная диэлектрическая проницаемость. Напряжение на j -м слое равно:

$$U_j = U_{\max} d_j \left/ \varepsilon_j \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\varepsilon_i} \right. . \quad (2)$$

В случае, когда в j -м слое форма электродов отличается от плоской, то максимальная напряжённость поля в нём будет в k_j^n раз больше, чем E_j , где k_j^n – это коэффициент неоднородности электрического поля:

$$E_j^{\max} = k_j^n U_{\max} \left/ \varepsilon_j \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\varepsilon_i} \right. . \quad (3)$$

k_j^n зависит от соотношения радиусов кривизны и расстояния между электродами j -го участка изоляции. В элементе $См2$ (рис. 1) одним из электродов является ребро магнито-провода с радиусом закругления $r_{M2} = 1$ мм. В качестве второго электрода выступает плоскость ПБ, расстояние до которой d_{M2} равно 2 мм. При таком соотношении $k_{M2}^n = 1,4$ [4].

Изоляция трансформатора в направлении от вторичной обмотки к экрану представляет собой многослойный цилиндрический конденсатор. Для этого случая максимальная напряжённость электрического поля в j -м слое выражается формулой [5; 6]:

$$E_j^{\max} = U_{\max} \left/ r_j \varepsilon_j \sum_{i=1}^n \frac{1}{\varepsilon_i} \ln \frac{r_{i+1}}{r_i} \right. , \quad (4)$$

где n – количество слоёв; r_i, r_{i+1} – внутренний и внешний радиусы i -го слоя соответственно; r_{n+1} – внешний радиус изоляции. Падение напряжения на каждом цилиндрическом слое равно:

$$U_j = E_j^{\max} r_j \ln \frac{r_{j+1}}{r_j} . \quad (5)$$

Рассмотрим изоляцию в направлении от вторичной обмотки к яру магнитопровода при $U_{\max} = 71$ кВ. Электрические параметры участков изоляции, а также результаты расчётов по формулам (1), (2), (3) приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры участков изоляции в направлении к яру магнитопровода при испытательном напряжении 71 кВ

Но- мер слоя j	Элемент эквива- лентной схемы	Толщи- на слоя d_j , мм	Материал слоя изоляции	Диэлек- трическая проницае- мость ε_j	Электри- ческая прочность, ξ_j , кВ/мм	Рассчитанная напря- жённость E_j , кВ/мм	Напря- жение на слое U_j , кВ
1	Cn	0,05	Эмаль полиэфирная	4,0	25 – 30	6,1	0,3
2	Cp	1,0	Фторопласт Ф-4	2,2	20 – 24	11,2	11,2
3	$См1$	3,0	Масло трансформа- торное	2,3	14 – 15	10,7	32,0
4	$Cпб$	1,0	Стеклотекс- толит	4,0	30 – 35	6,1	6,1
5	$См2$	2,0	Масло трансформа- торное	2,3	14 – 15	15,0	21,4

Согласно полученным результатам первые четыре слоя нагружены в пределах своих электрических прочностей, а напряжённость масляного промежутка $C_{м2}$ приблизилась к допустимому пределу. Таким образом, на этом промежутке возможно возникновение частичного разряда, способного привести к сквозному пробою.

Рассмотрим изоляцию в направлении от вторичной обмотки к экрану при $U_{\max} = 75$ кВ. Внутренний радиус кривизны первого слоя (изоляция поверхности экрана первичной обмотки) равен 18 мм, остальные параметры конструкции приведены в табл. 2, где также даны результаты расчётов по формулам (4), (5).

В элементе C_k одним из электродов является край вторичной обмотки с радиусом закругления 0,5 мм. В качестве второго электрода рассматривается внутренняя поверхность ВК, расстояние до которой 1 мм. При этом в элементе C_k формируется неоднородное электрическое поле с коэффициентом неоднородности $k_k'' \geq 1,5$ [4]. Поэтому в табл. 2 для участка C_k показано значение напряжённости поля, равное произведению расчётного на этот коэффициент.

Таблица 2

Параметры участков изоляции в направлении к экрану при испытательном напряжении 75 кВ

Но- мер слоя j	Элемент эквива- лентной схемы	Тол- щина слоя d_j , мм	Материал слоя изоля- ции	Диэлектри- ческая про- ницаемость ϵ_j	Электриче- ская проч- ность ξ_j , кВ/мм	Рассчитанная напряжён- ность $E_j^{\max}$, кВ/мм	Напря- жение на слое U_j , кВ
1	$C_э$	0,5	Стекло- тек- столит	4,0	30 – 35	7,4	3,4
2	$C_{м3}$	2,0	Масло- транс- форма- торное	2,3	14 – 15	12,5	22,5
3	$C_{цб}$	1,0	Полиа- мид ПА-6	3,5	18 – 20	7,4	6,9
4	$C_{м4}$	3,0	Масло- транс- форма- торное	2,3	14 – 15	10,8	28,7
5	C_k	1,0	Фторо- пласт Ф-4	2,2	20 – 24	14,7	9,1
6	C_n	0,05	Эмаль полиэфир- ная	4,0	25 – 30	5,2	0,5

Полученные результаты свидетельствуют о наличии запаса по электрической прочности в этом направлении. Наиболее слабым местом этой изоляции является масляный

промежуток $СмЗ$, к пробую которого может привести дальнейшее увеличение приложенного напряжения $U_{\max}$.

Экспериментальные исследования. Для проверки теоретических выводов исследуемый ТВН с вариантом ВК без удлиненного верхнего ребра был погружен в прозрачный резервуар с трансформаторным маслом. Испытательное напряжение вырабатывалось этим же ТВН. Целью экспериментов было определение предельной электрической прочности конструкции, при которой происходит сквозной пробой, приводящий к потере работоспособности трансформатора.

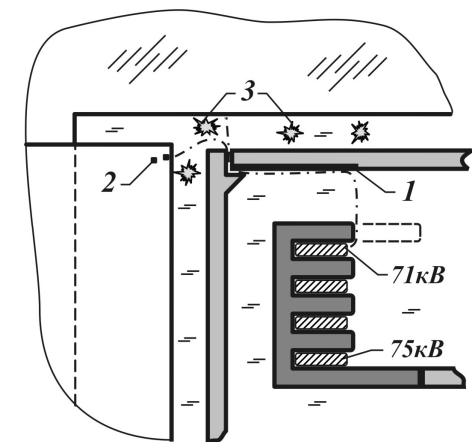


Рис. 2. Признаки пробоя изоляции при испытаниях конструкции ТВН на электрическую прочность: 1 – след в виде чёрной прямолинейной линии; 2 – следы в виде чёрных точек; 3 – ориентировочное расположение вспышек света при разрядах

В ходе эксперимента сквозной пробой наступил через 30 с после достижения напряжения (75 ± 1) кВ. После разборки ТВН в ходе осмотра поверхностей его деталей было выявлено (рис. 2):

а) на ПБ образовался обугленный чёрный след (трек) в виде тонкой прямолинейной линии;

б) у края заземлённого экрана первичной обмотки образовалось несколько чёрных точек.

Наличие трека 1 свидетельствует о том, что одним из основных механизмов пробоя является развитие разряда по поверхности вдоль тангенциальной составляющей электрического поля. Штрихпунктирными линиями на рис. 2 показаны наиболее вероятные траектории пробоя, направленные к стыку ПБ и ЦБ.

С целью снизить роль поверхности при возникновении разряда была собрана и испытана конструкция, в которой ВК имеет удлиненное верхнее ребро. Как и в первоначальном эксперименте выходное напряжение ТВН было установлено равным (75 ± 1) кВ. За время выдержки 1 мин сквозной пробой изоляции не произошёл, однако в течение этого времени были замечены многочисленные вспышки частичных разрядов 3 (см. рис. 2), дрейфующие вдоль поверхностей ПБ и ярма магнитопровода. При незначительном увеличении напряжения наступил пробой с потерей работоспособности ТВН. Данные экспериментальные наблюдения соответствуют сделанным ранее теоретическим прогнозам, что свидетельствует о достоверности разработанной модели изоляции.

Выводы. Приведенная методика построения электрической модели изоляционной конструкции позволила провести расчёты рабочих напряжённостей электрических полей. Полученные результаты согласуются с экспериментальными наблюдениями и выявляют слабые места изоляции. Введение удлиненного верхнего ребра высоковольтной катушки повышает надёжность конструкции. Дальнейшие усовершенствования должны преследовать цель исключить возникновение условий для развития разрядов вдоль поверхностей, а также цель получить более равномерное распределение напряжённости полей по деталям конструкции.

Список литературы

1. Мирошниченко С. И. Цифровая бесплёночная рентгенография. Состояние и тенденции развития // Променевая диагностика, променевая терапия. – 2000. – №1. – С. 67 – 70.
2. Драбович Ю. И., Криштафович И. А., Никитин И. Е. Модульные системы высоковольтного вторичного электропитания. – К.: Препр. ИЭД АН УССР, 1989. – 29 с.

3. Кондра Б. Н., Хоминич В. И. Высоковольтные испытательные и технологические установки. – К.: УМК ВО, 1992. – 243 с.
4. Дмоховская Л. Ф., Ларионов В. П., Пинталь Ю. С. Техника высоких напряжений. – М.: Энергия, 1976. – 488 с.
5. Дмитриевский В. С. Расчёт и конструирование электрической изоляции. – М.: Энергоиздат, 1981. – 392 с.
6. Бейер М., Бёк В., Мёллер К. Техника высоких напряжений: теоретические и практические основы применения. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 555 с.

С. І. Мірошніченко, Ю. А. Щиголєв

Електрична модель ізоляції високовольтного генератора рентгенодіагностичної системи

Описано електричну модель головної ізоляції високовольтного трансформатора, який входить до складу генератора рентгенодіагностичної системи. Виконано розрахунки напруженостей електричних полів у деталях конструкції. Під час експериментальних досліджень електричної стійкості виявлено ознаки пробою, що підтверджують теоретичні висновки.

S. I. Miroshnichenko, Y. A. Schigolev

Electrical model of insulation high voltage X-ray generator

This article represents the insulation electrical model of high-voltage transformer, which is included in the X-ray diagnostic system. The electric field intensity, which is concentrated inside the construction details, are calculated. The experimental check confirmed the certainty of the theoretical conclusions.