

С.Г. ЛОМОВ, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»

ПОВЫШЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ КОЛЛЕКТОРА МПТ (Часть 1)

Теоретически показана возможность увеличения электрической прочности коллектора машин постоянного тока за счет применения в поверхностном слое межламельной изоляции композиционного диэлектрического материала с существенно различными значениями диэлектрической проницаемости.

Ключевые слова: изоляция, коллектор машин постоянного тока.

Введение. Повышение питающего напряжения – одна из основных возможностей повышения удельной мощности машин постоянного тока (МПТ). Одним из основных сдерживающих факторов повышения этого напряжения является электрическая прочность коллектора МПТ. Под термином «электрическая прочность коллектора» здесь и ниже понимается стойкость коллектора МПТ к возникновению, как полного газоразрядного пробоя по его поверхности между щеточными траверсами (круговой огонь), так и частичных разрядов между смежными коллекторными пластинами (вспышки на коллекторе). В основе всех современных практических критериев электрической прочности коллектора МПТ лежат величины межламельного напряжения или его градиента. Однако, опыт эксплуатации крупных и напряженных в потенциальном отношении МПТ дает примеры того, что возникают перекрытия по коллектору у машин, обладающим значительным теоретическим запасом электрической прочности коллектора по всем известным критериям. Очевидно, что межламельный промежуток на коллекторе, как и весь токосъемный узел МПТ должны стать предметом более детального изучения с точки зрения происходящих в них процессов.

Несмотря на важность вопроса об электрической прочности коллектора, в теории возникновения и развития кругового огня на коллекторе до настоящего времени много спорных положений, отсутствует единая точка зрения на причину возникновения, развития и количественных критериев этого явления. Эти обстоятельства заставляют проектировщиков быть осторожными в увеличении питающего напряжения МПТ.

Анализ публикаций. В настоящее время существуют две основные теории возникновения кругового огня. Первая считает, что

© С. Г. Ломов, 2013

инициатором кругового огня является поверхностный пробой изоляции двух смежных коллекторных пластин в области максимальных межламельных напряжений, который в литературе называется «единичной вспышкой» [2,3]. Вторая теория считает, что повышение напряжения между смежными коллекторными пластинами играет лишь вспомогательную роль в возникновении кругового огня. По этой теории начальная дуга загорается на коллекторе под щеткой в результате расстройств коммутации или механических причин (подпрыгивание щетки вытягивается из-под последней и поддерживается между сбегавшей гранью щетки и уходящими из-под неё коллекторными пластинами. По мере продвижения дуги увеличение напряжения между смежными пластинами поддерживает дугу [4]. Некоторые авторы пытаются объединить изложенные выше два основных взгляда на природу возникновения кругового огня, показывая, что эти теории не противоречат, а дополняют друг друга. Мы считаем, что каков бы ни был истинный механизм и причины возникновения кругового огня, величина напряжения между смежными коллекторными пластинами является основным фактором, определяющим протекание этого процесса.

Целью данной работы. Теоретическое и экспериментальное исследования возможности повышения питающего напряжения МПТ большой и предельной мощностей без изменения электромагнитных и геометрических параметров МПТ.

Основной материал исследований. Рассмотрим поверхностный (загрязненный) слой межламельной изоляции на коллекторе МПТ. Для расчета токов и напряжений в этом слое воспользуемся методом эквивалентных схем. В 1940 году Мантров М.И. в [1] впервые предложил этот метод для расчета тока и напряжения по поверхности проходного изолятора. Межламельный промежуток на коллекторе МПТ может быть представлен эквивалентной схемой, представленной на рис. 1.

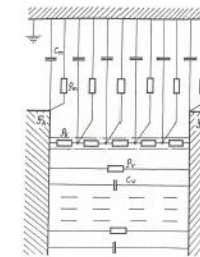


Рис. 1 – Эквивалентная схема межламельного промежутка

Штрих-пунктирными линиями выделен рассматриваемый слой загрязнения или в общем случае поверхностный слой межламельной изоляции с удельным сопротивлением току проводимости ρ_s . Между смежными коллекторными пластинами существует удельное объемное сопротивление ρ_v и удельная емкостная связь c_v . Воздушный промежуток над поверхностным слоем изоляции обладает распределенной удельной емкостью c_m . Теоретически воздушный промежуток обладает удельным сопротивлением ρ_m . При расчетах по данной эквивалентной схеме приняты следующие допущения: коллектор в осевом направлении является бесконечным и величины ρ_s , ρ_m , c_m , c_v считаются на один метр длины коллектора; распределенная удельная емкость c_m одинакова по всей ширине межламельного промежутка и существует только над поверхностью изоляции; потенциалы θ_A и θ_B изменяются по синусоиде и синфазно; токи, протекающие в объеме межламельной изоляции, значительно меньше поверхностных токов и они исключены из рассмотрения. На рис. 2 схематически показаны токи, протекающие на поверхности межламельной изоляции.

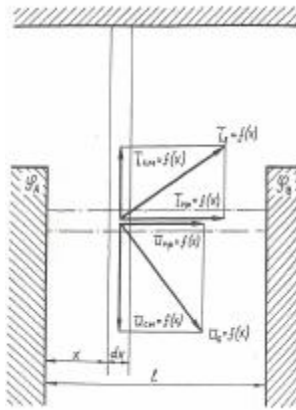


Рис. 2 – Токи на поверхности межламельной изоляции

При известном спектральном анализе кривой межламельного напряжения метод расчета тока в поверхностном слое изоляции заключается в следующем: 1) Рассчитывается в нескольких определенных точках n по ширине l межламельного промежутка вектор тока \vec{i}_s , соответствующий первой гармонике межламельного напряжению. При этом величина потенциала θ_B принимается равной якорному напряжению МПТ, а потенциал θ_A меньше на максимальную величину межламельного напряжения данной гармоники в данной

точке коллектора. 2) В тех же точках n рассчитывается вектор тока \vec{i}_s для последующих гармоник v . При этом потенциал θ_A принимается равным нулю, а потенциал θ_B равным части межламельного напряжения для соответствующей гармоники. Для рассматриваемого диапазона частот удельные емкостные параметры на коллекторе МПТ принимаются постоянными. 3) В каждой точке n рассчитывается вектор тока $\sum_{i=1}^v \vec{i}_s$ как геометрическая сумма векторов \vec{i}_s для всех рассмотренных гармоник. 4) Рассчитывается вектор тока \vec{I}_s , как среднее значение вектора тока $\sum_{i=1}^v \vec{i}_s$ по ширине межламельного промежутка.

$$\vec{I}_s = \frac{\left(\sum_{i=1}^n \sum_{i=1}^v \vec{i}_s \right)}{n} \quad (1)$$

Модуль вектора поверхностного тока $|\vec{I}_s|$, по нашему мнению может служить объективным критерием стойкости коллектора МПТ к возникновению кругового огня. Рассмотрим решение для поверхностного тока при синусоидальном межламельном напряжении. Воспользовавшись первым и вторым законами Кирхгофа можно записать систему уравнений для тока и напряжения на поверхности изоляции межламельного промежутка в соответствии с эквивалентной схемой.

$$-\frac{d\vec{i}_s}{dx} = \vec{\sigma} \times \left(\frac{d\vec{u}_s}{dx} \right) \quad (2)$$

$$-\frac{d\vec{u}_s}{dx} = \vec{Z} \times \vec{i}_s, \quad (3)$$

$$\text{где } \vec{\sigma} = (1/\rho_s + 1/\rho_m) + j\omega t, \quad \vec{Z} = (\rho_s + \rho_m) + j(1/\omega C_m) \quad (4)$$

При синусоидальной форме приложенного к межламельному промежутку напряжения:

$$\vec{u}_s = \vec{U}_s \times \exp(j\omega t); \quad \vec{i}_s = \vec{I}_s \times \exp(j\omega t) \quad (5)$$

система уравнений (2,3) переписывается в виде:

$$-\frac{d\vec{I}_s}{dx} = (\vec{\sigma} + j\omega \vec{C}_m) \times \vec{U}_s \quad (6)$$

$$-\frac{d\vec{U}_s}{dx} = \vec{Z}_s \times \vec{I}_s \quad (7)$$

Мы получили систему уравнений для векторов, сдвинутых только в пространстве. Были рассчитаны по (6,7) несколько сотен вариантов изменения поверхностного тока при изменении параметров межламельного промежутка $\vec{I}_s = \psi(c_m, \rho_s, \theta_A, \theta_B, l, f)$. Расчеты показали значительное влияние емкостной составляющей на величину полного поверхностного тока межламельной изоляции коллектора МПТ, особенно при наличии в спектре межламельного напряжения высокочастотных гармоник.

Естественным является вопрос, если определяемый нами полный поверхностный ток $|\vec{I}_s|$ является одним из критериев электрической прочности коллектора, то есть ли у нас возможность уменьшения величины этого тока и тем самым увеличения электрической прочности коллектора без изменения геометрических и электромагнитных параметров самой МПТ. Составляющая тока проводимости \vec{i}_{np} в поверхностном токе \vec{i}_s определяется реальным загрязнением межламельного промежутка при эксплуатации МПТ, лежит в широких пределах $10^2 \dots 10^6$ Ом/м и регулироваться нами не может. Можно ли уменьшить емкостную составляющую полного тока. Ответить на этот вопрос важно, потому что расчеты показали – емкостная составляющая в большинстве случаев реальной эксплуатации МПТ значительно больше составляющей тока проводимости.

Рассмотрим распределение электрического поля в кусочно-однородных идеальных диэлектрических средах с существенно различными значениями диэлектрической проницаемости ϵ_i . На рис. 3 показан многослойный диэлектрик, заключенный между электродами А и В. Границы раздела диэлектриков со значениями ϵ_1 и ϵ_2 нормальны к линиям напряженности внешнего электрического поля $E_{внешн.}$

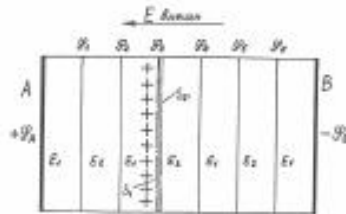


Рис. 3 – Многослойный диэлектрик, заключенный между электродами А и В.

Система уравнений Максвелла для идеальных диэлектрических сред дает ряд следующих соотношений для кусочно-однородной среды.

$$\oint \vec{D} ds = 0; \int_0^{\epsilon_1} \vec{D} ds + \int_0^{\epsilon_2} \vec{D} ds = -D_1 + D_2 = 0; \quad (8)$$

$$\vec{D}_1 = \vec{D}_2; \vec{D} = \epsilon \vec{E}; \vec{E}_1 = \vec{D}_1 / \epsilon_1; \vec{E}_2 = \vec{D}_2 / \epsilon_2;$$

Для показанной на рис.3 области можно записать выражение потенциалов на границах раздела в абсолютных величинах в соответствии с (8)

$$|(\theta_A - \theta_1)| + |(\theta_1 - \theta_2)| + \dots + |(\theta_{n-1} - \theta_n)| + |(\theta_n - \theta_B)| = |(\theta_A^* - \theta_B^*)| \quad (9)$$

или в общем виде:

$$\sum_{i=1}^n |(\theta_i - \theta_{i+1})| = |(\theta_A^* - \theta_B^*)| \quad (10)$$

Нами было высказано предположение, что при определенных значениях ϵ_1, ϵ_2 и размерах слоев диэлектриков математически должно выполняться соотношение:

$$|(\theta_A^* - \theta_B^*)| > |(\theta_A - \theta_B)| \quad (11)$$

Физически условие (11) невыполнимо, потенциалы на смежных коллекторных пластинах не могут изменяться из-за состава межламельной изоляции и всегда должно выполняться соотношение:

$$|(\theta_A^* - \theta_B^*)| = |(\theta_A - \theta_B)|, \quad (12)$$

что математически обеспечивается условием:

$$|\theta_1| < |\theta_A| < |\theta_B| \quad (13)$$

Физически условие (13) соответствует изменению направления вектора напряженности электрического поля на поверхности межламельной изоляции в интервале между электродами А и В.

Предложена конструкция коллектора МПТ, показанная на рис. 4.

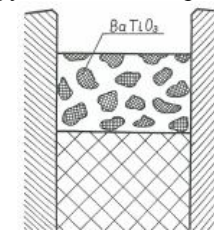


Рис. 4 – Конструкция коллектора МПТ

Миканитовая межламельная изоляция фрезеруется (продораживается) на несколько большую глубину, чем обычная изоляция (на глубину 2...2,5 мм). Продороженный объем заполняется смесью поликристаллического порошка титаната бария BaTiO_3 и связующего, обеспечивающего достаточные механическую и адгезионную прочности. Для определения оптимального процентного содержания и геометрических размеров включений BaTiO_3 в поверхностном слое изоляции были проведены расчеты электрического поля в этой области, некоторые результаты которых показаны на рис.5. Относительная диэлектрическая проницаемость BaTiO_3 принята постоянной и не зависящей от напряженности электрического поля, а размеры зерен BaTiO_3 приняты прямоугольными и одинаковыми. В целом кусочно-однородная среда считается, как идеально диэлектрическая, то есть для расчетной области решается классическое уравнение Лапласа. Зная распределение электрического поля в объеме кусочно-однородной среды, (в частности, на поверхности межламельной изоляции) мы можем рассчитать полный поверхностный ток $|\vec{I}'_s|$ аналогично. Увеличение электрической прочности П коллектора рассчитывается как:

$$P = \left(\frac{|\vec{I}'_s - \vec{I}_s|}{\vec{I}_s} \right) \cdot 100 \% \quad (14)$$

Увеличение электрической прочности П коллектора в широком диапазоне расчетных параметров оставалось практически постоянным и находилось в пределах 29...31%. Так как расчеты проводились при достаточно идеализированных условиях, очевидна необходимость экспериментальной проверки теоретически полученного эффекта увеличения электрической прочности коллектора МПТ, что будет представлено во второй части работы.

Выводы. Основным выводом данной части работы является то, что теоретически показана возможность увеличения электрической прочности коллектора без изменения электромагнитных и геометрических параметров МПТ.

Список литературы: 1. Мантров М. И. Электрические разряды на поверхности диэлектрика / М. И. Мантров // Электричество. – 1940. – № 9. – С. 23-27. 2. Иоффе А. Б. Потенциальные условия на коллекторе высоковольтных тяговых электродвигателей и пути их облегчения / А. Б. Иоффе // Электричество. – 1954. – № 1. – С. 12-18. 3. Рабешко А. С. Экспериментальное исследование кругового огня на тяговом некомпенсированном электродвигателе / А. С. Рабешко, В. Я. Элснис, Б. Г. Хануков // Электромашиностроение и электрооборудование. – 1979. – № 29. – С. 78-81. 4. Саенко Н. Л. Возникновение кругового огня по коллектору тягового электродвигателя / Н. Л. Саенко // Электротехническая промышленность. Сер.: Тяговое и подъемно-транспортное

электрооборудование. – 1976. – № 1. – С. 16-18. 5. Ермолин Н. П. Переходные процессы в машинах переменного тока / Н. П. Ермолин. – М.: Энергоиздат, 1951. – 336 с.

Надійшла до редколегії 21.10.2013

УДК 621.315

Повышение электрической прочности коллектора МПТ / С. Г. Ломов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХПІ», 2013. – № 59 (1032). – С. 84–91. – Бібліогр.: 5 назв.

Теоретично показана можливість збільшення електричної міцності колектора машин постійного струму за рахунок використання в поверхневому шарі міжламельної ізоляції композиційного діелектричного матеріалу із різними значеннями діелектричної проникності.

Ключові слова: ізоляція, колектор машин постійного струму.

Possibility of incensement electric strength of electric machine electric insulation is shown.

Keywords: insulation, collector of electric machine