

ЭЛЕКТРОМОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЯ ЭСГС

И. П. ГУК, В. А. ЛУКУТИН

(Представлена научным семинаром кафедры ТОЭ)

Одним из основных условий повышения удельной мощности электростатических генераторов с транспортерами-проводниками (ЭСГС) является получение максимально возможного значения средней напряженности электрического поля, что может быть достигнуто повышением электрической прочности среды и выравниванием поля в рабочем объеме машины [1].

Достижение максимальной равномерности электрического поля, в свою очередь, требует тщательного его исследования с учетом физических свойств материалов, из которых изготовлены основные элементы генератора, геометрических размеров электродов и их взаимного расположения. Наилучшим решением данной задачи, несомненно, было бы полное математическое описание поля, но в такой многоэлектродной системе, как ЭСГ, с большим числом транспортеров-проводников, аналитические расчеты приводят к очень сложным выражениям, которые трудно использовать для анализа. А непосредственное экспериментирование на действующих образцах с целью определения дифференциальных характеристик поля практически невозможно из-за малой толщины воздушного зазора (доли миллиметра). В то же время применение методов электрического моделирования позволяет производить не только качественный, но и количественный анализ с точностью, достаточной для инженерных целей. А так как до настоящего времени исследование поля ЭСГС практически не проводилось [2, 3], то большое значение имеет физическая наглядность решения, что и достигается построением картин поля при помощи электролитической ванны, самого простого и экономичного метода электрического моделирования, основанного на аналогии математических уравнений поля тока в проводящей среде и электростатического поля.

При исследовании ЭСГ в первую очередь представляет интерес процесс преобразования механической энергии в электрическую, поэтому вполне достаточно на первом этапе ограничиться построением модели для исследования электрического поля генератора, работающего в установившемся режиме, для момента времени, которому соответствует определенное расположение элементов статора и ротора.

Электрическое поле рассматриваемого генератора удовлетворяет условиям квазистационарности, следовательно, для любого момента времени его можно описать уравнением Пуассона, при моделировании которого подобие явлений в природе и в модели получается автомати-

чески лишь при соблюдении геометрического подобия и при правильном задании граничных условий [4].

Ниже излагается методика моделирования в электролитической ванне поля цилиндрического ЭСГ с транспортерами-проводниками, принцип работы и конструктивные элементы которого описаны в [1, 2, 3] и ряде других работ.

На рис. 1 показаны принципиальная схема, расположение и геометрические размеры элементов ЭСГ. Так как длина генератора велика по сравнению с расстоянием транспортер — статор, то при моделиро-

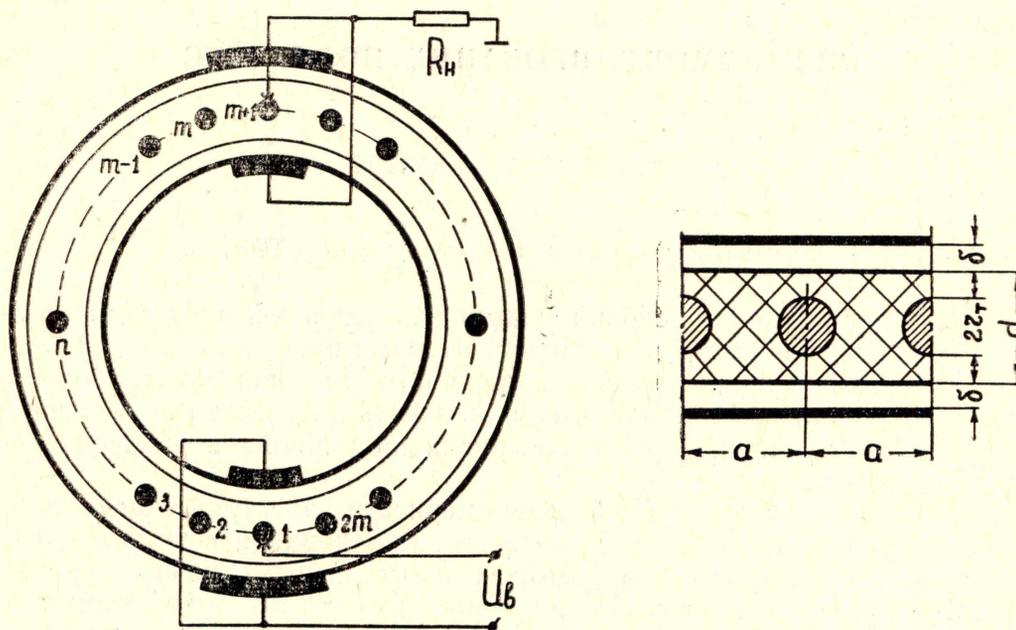


Рис. 1

вании краевым эффектом можно пренебречь и считать поле плоскопараллельным. Как видно из рисунка, ротор состоит из $2m$ транспортеров-проводников, расположенных на одинаковом расстоянии и изолированных друг от друга. Если предположить отсутствие утечек по изоляции, что должно выполняться в хорошо спроектированном генераторе, и контактную коммутацию, то в установившемся режиме в момент отрыва 1-го и $(m+1)$ -го транспортеров от соответствующих щеток, транспортеры 1, 2, 3... m имеют заряд q , а $(m+1)$, $(m+2)$, ..., $2m$ — заряд q' . Разность этих зарядов отдается в нагрузку, сопротивление которой R_n , и тем самым определяется как ток (I_n), так и напряжение (U_n) нагрузки. Для более равномерного распределения напряжения по статору последний обычно выполняется из полупроводящего материала (стекла). Таким образом, реализация граничных условий при моделировании поля ЭСГ будет состоять как бы из решения двух задач: во-первых, в задании распределения напряжений по статору (если принять заряды транспортеров равными нулю, то это будет задача Дирихле для уравнения Лапласа) и, во-вторых, в задании источников тока, моделирующих правую часть уравнения Пуассона.

При решении первой задачи граничные условия обычно задают дискретно при помощи эквипотенциальных электродов [7, 8]. Подобная дискретная аппроксимация непрерывной потенциальной функции, хотя и является универсальной, обладает рядом недостатков, главными из которых являются «провисание» потенциала между электродами и необходимость смещения фактических границ модели [10], что приводит

к значительным погрешностям в случае моделирования поля в узких областях, например, в воздушном зазоре электромагнитных и электростатических машин. Попытки устранения этих недостатков за счет увеличения числа электродов, задающих граничную функцию, приводят соответственно к увеличению переменных сопротивлений и измерительных приборов. А если учесть, что в модели ЭСГ необходимо реализовать еще и большое число источников тока, то становится очевидным, что моделирование в электролитической ванне теряет такие свои преимущества, как простота и удобство настройки модели и ее эксплуатации.

Для устранения погрешностей, возникающих при дискретной аппроксимации граничной функции минимально допустимым числом эквипотенциальных электродов, можно использовать тонкую полосу постоянного сечения из слабопроводящего материала (например, из резины с повышенной проводимостью). Для этого необходимо полосу расположить по контуру исследуемой области и присоединить к ней, обеспечив хороший контакт, граничные электроды, число которых можно взять раза в два меньше, чем по известной методике [8].

В некоторых случаях можно и вовсе обойтись без граничных электродов, как это делают при моделировании с помощью проводящей бумаги [9]. Так, например, при задании в модели линейного распределения напряжений достаточно вырезать полосу постоянной ширины и к ее концам подключить источник напряжения.

Удельная объемная проводимость слабопроводящего материала подбирается экспериментально, исходя из следующего условия: она должна быть значительно меньше проводимости электродов, но больше примерно на два порядка проводимости электролита.

В электростатическом генераторе распределение напряжений по статору желательно иметь линейным [1, 2, 3 и др.], в таком случае моделирование граничной функции изложенным способом будет простым и в то же время свободным от недостатков, присущих дискретному заданию граничных условий.

Реализация заряженных транспортеров не представляет трудности: достаточно в модели представить их проводниками, включенными через большие переменные сопротивления к источнику напряжения. Значительные же неудобства возникают при настройке модели, так как нужно иметь большое число миллиамперов (равное числу транспортеров) для измерения токов. Поэтому в схемы моделирования, показанные на рис. 2 и 3, были введены переключатели, которые позволяют обойтись одним измерительным прибором или двумя, если заряды транспортеров имеют равный знак. Если при вращении переключателя

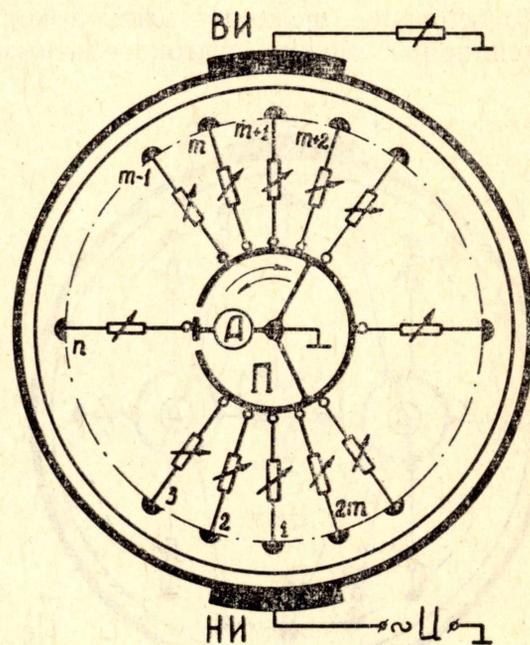


Рис. 2. Схема моделирования в режиме нагрузки: А — амперметр, П — переключатель, НИ — низковольтный индуктор, ВИ — высоковольтный индуктор

один из электродов включается через сопротивление и миллиамперметр к зажиму источника напряжения, то все остальные подсоединяются к этому зажиму, минуя измерительный прибор. Регулировка величин токов производится переменными сопротивлениями.

При заданном распределении напряжений по статору и известном напряжении возбуждения (U_b) модель нужно настроить так, чтобы

$$I_1 = I_2 = \dots = I_m \text{ и } I_{m+1} = I_{m+2} = \dots = I_{2m},$$

а соотношение величин этих токов было таким, чтобы разность потенциалов между высоковольтным индуктором и находящимся под ним транспортером ($m+1$) равнялась нулю. Это объясняется тем, что в оригинале во время коммутации они соединяются посредством щетки.

В случае изменения режима работы ЭСГ моделирование поля нужно производить изложенным способом при соответствующем задании граничных и начальных условий.

Эксперименты по снятию картин электрического поля ЭСГ проводились в электролитической ванне, размером $1200 \times 1200 \times 1200$ мм. Ванна была сварена из листов винипласта толщиной 10 мм и усилена ребрами жесткости, а схема измерений собрана на отдельной плате из оргстекла. В качестве электролита использовалась смесь дистиллированной и очищенной водопроводной воды с удельной

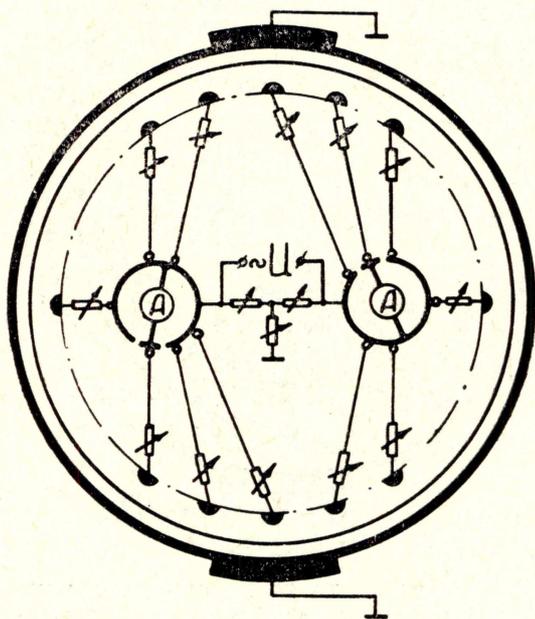


Рис. 3. Схема моделирования в режиме короткого замыкания

объемной проводимостью порядка $10^{-4} \frac{1}{\text{ом см}}$. Для уменьшения гальванического эффекта все электроды изготовлялись из латуни.

Точность моделирования определялась на моделях конденсаторов различной конфигурации (плоскость — плоскость, цилиндр — цилиндр и т. д.), картины поля которых можно получить из расчета. Одновременно было проверено влияние частоты переменного тока, используемого для питания модели, на результаты измерений. Разброс последних при изменении частоты от 50 до 2000 Гц составляет не более 3% для внутренних задач теории поля и не более 15% для внешних, а так как поле ЭСГ относится к первым, то в дальнейшем питание осуществлялось током промышленной частоты.

Теоретическое обоснование метода электролитической ванны, описание устройств, на которых реализуется этот метод, источники погрешностей и пути их устранения подробно изложены в [4, 5, 6] и др., поэтому мы остановились только на положениях, непосредственно касающихся моделирования поля ЭСГ.

Прежде чем приступить к детальному исследованию электрического поля ЭСГ, были сняты картины поля во всем зазоре ротор — статор в предположении однородности среды (приняли диэлектрическую проницаемость воздушного зазора и материала ротора одина-

ковой). Эксперименты проводились для различных режимов работы генератора при изменении числа транспортеров — проводников круглого сечения в случае кондукционной схемы возбуждения. В работе в качестве примера приведены картины полей ЭСГ с 32 транспортерами для режимов короткого замыкания, нагрузки и холостого хода. На всех картинах за единицу принято напряжение возбуждения, т. е. потенциал транспортера, находящегося под низковольтным индуктором, а потенциал последнего равен нулю. Разность потенциалов между двумя любыми соседними эквипотенциалами на рис. 4 и 5 равна $0,4 U_v$, а на рис. 6 — $0,32 U_v$.

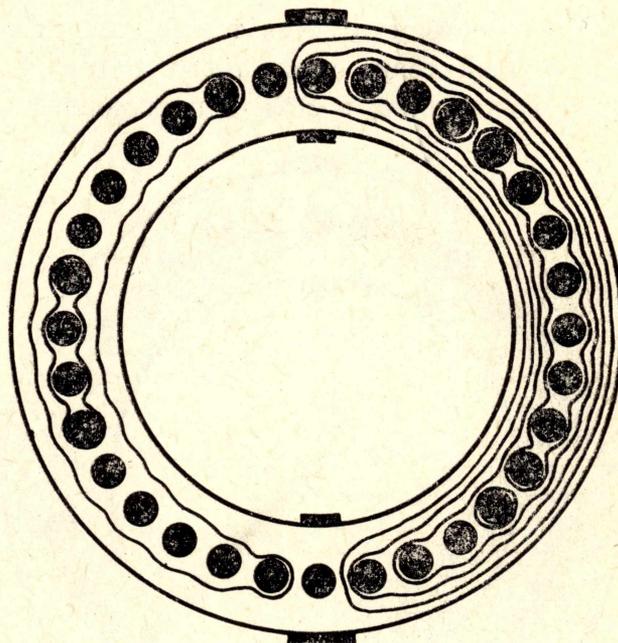


Рис. 4

Из картины поля для режима короткого замыкания (рис. 4) видно, что потенциалы в одной половине зазора выше нуля, а в другой — ниже. Это может быть только в том случае, когда заряды транспортеров прямого и обратного хода имеют разные знаки. Явление это объясняется связью между коммутирующим транспортером и соседними и называется естественной перезарядкой. При положительных зарядах на всех транспортерах в модели невозможно установить разность потенциалов, равную нулю, между высоковольтным индуктором и $(m + 1)^m$ транспортером.

Для выяснения влияния числа транспортеров на поле модель выполнялась с 8, 16, 24 и 32 транспортерами одинакового радиуса (r_T). Было выяснено, что с уменьшением расстояния между транспортерами при одной и той же разности зарядов q и q' поле становится более равномерным, нормальная составляющая напряженности поля уменьшается, а касательная увеличивается. Это означает, что увеличивать число транспортеров при постоянном диаметре ротора нужно до тех пор, пока максимальный ток короткого замыкания не начнет уменьшаться за счет разрядов по коллектору. Таким образом, необходимо найти такую рациональную конструкцию генератора, чтобы получить максимальную равномерность поля при минимальной касательной составляющей напряженности поля.

На рис. 5 представлена картина поля для режима холостого хода идеального генератора. В большей части рабочего объема машины поле довольно равномерное, а искажение его получается за счет большого диаметра транспортеров. Наибольших градиентов потенциалы достигают в зоне низковольтных индукторов, а наименьших — в зоне высоковольтных. Последнее объясняет реакцию якоря, под которой подразумевается по аналогии с электромагнитными машинами уменьшение тока при увеличении напряжения нагрузки.

Если воспользоваться методом наложения, то в нагрузочном режиме, следовательно, и в режиме холостого хода (последний можно рассматривать как предельный режим нагрузки) электрическое поле

в рабочем объеме ЭСГ можно разложить на две составляющие: на поле \bar{E}_c , созданное распределением напряжений по внутренним поверхностям полупроводящего статора, и на поле ротора \bar{E}_p — поле от линейных зарядов транспортеров, т. е.

$$\bar{E} = \bar{E}_c + \bar{E}_p .$$

Наилучшим считается такой генератор, в котором напряженность \bar{E}_c в любой точке воздушного зазора была бы перпендикулярной \bar{E}_p . К сожалению, в ЭСГ с проводящими транспортерами это выполнить невозможно, в нагруженных режимах появляется нормальная составляющая поля статора, величина которой зависит от геометрических и физических параметров ЭСГ. Так, путем моделирования установлено, что E_{cn} возрастает при увеличении толщины ротора и воздушного зазора, числа транспортеров и их радиусов, а также, что E_{cn} тем больше, чем значительнее отличаются диэлектрические проницаемости воздушного зазора и материала тела ротора. К тому же было выяснено, что на линии, проходящей через середины индукторов, в области разрядки транс-

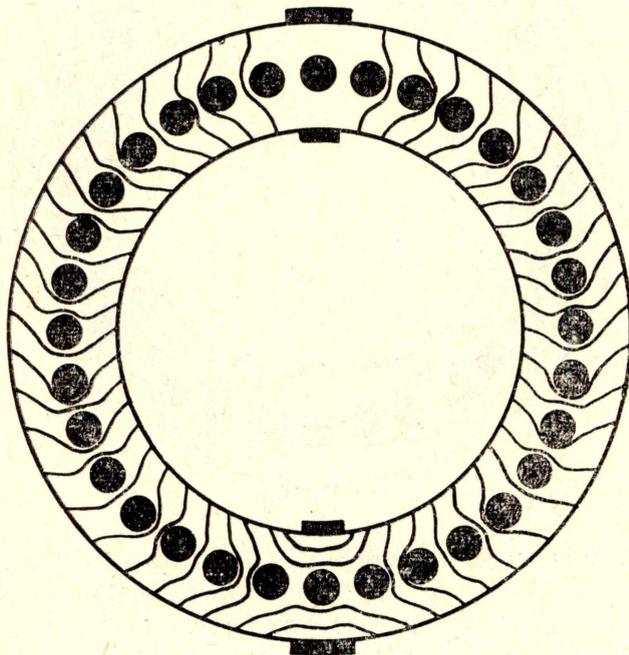


Рис. 5

портеров напряженности \bar{E}_{cn} и \bar{E}_{pn} вычитаются, а в зоне зарядки — складываются арифметически, что приводит к нежелательным эффектам. Более детальное исследование поля ЭСГ показало, что с увеличением \bar{E}_{cn} уменьшается теоретический коэффициент увеличения напряжения

$$k_U = U_{xx} / U_B .$$

Моделирование ЭСГ показало: поля в нагруженных режимах можно рассматривать как промежуточные между полем короткого замыкания и полем холостого хода, следовательно, все закономерности, присущие последним, будут справедливы для поля генератора в режиме нагрузки.

Картина поля (рис. 6) снята для случая, когда заряд взят равным нулю, так как в этом режиме нагрузки легче обнаружить общие закономерности. В рабочей части ротора (прямой ход) как нормальная, так и касательная составляющая поля велики, особенно в зоне, прилегающей к индукторам возбуждения. Из картины поля видно, что три транспортера, подходящие к разрядной щетке, имеют потенциал выше потенциала высоковольтного индуктора. При этом замечено, что число таких транспортеров и их потенциалы возрастают с уменьшением расстояния между транспортерами при постоянном диаметре ротора. Сбегающая часть ротора (обратный ход) находится в более благоприятных условиях: здесь E_n весьма мала.

Подводя итог рассмотрению картин поля генератора, следует отметить, что изменение одних и тех же параметров приводит как к положительным, так и к отрицательным явлениям: естественная перезарядка и реакция якоря, выравнивание поля в зазоре ротор — статор и уменьшение коэффициента κ_v и т. д. Поэтому для получения

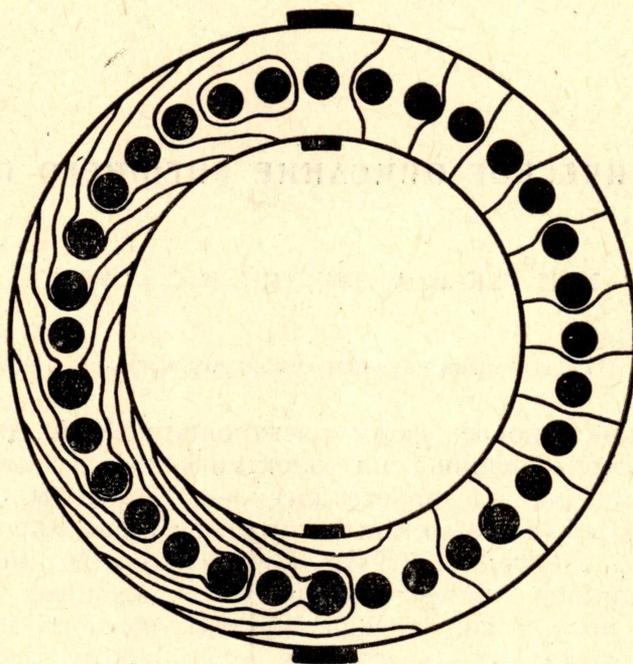


Рис. 6

максимальной удельной мощности необходимо провести более детальное исследование электрического поля ЭСГ в комплексе с теоретическими и экспериментальными исследованиями. При этом в первую очередь следует уточнить влияние материала статора и ротора, среды в зазоре, геометрии электродов статора и транспортеров на величину максимальной напряженности поля в газовом зазоре генератора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. Н. Гохберг, А. Ф. Иффе, Н. И. Рейнов. ЖТФ, 1939, № 23.
2. В. И. Левитов, А. Г. Ляпин. Электростатические генераторы с жестким ротором. Ч. 1, М., 1963.
3. В. Д. Эськов. Исследование ЭСГ с каскадным соединением транспортеров. Диссертация, 1966.
4. В. А. Веников. Применение теории подобия и физического моделирования в электротехнике. ГЭИ, 1949.
5. Ч. Карплюс. Моделирующие устройства для решения задач теории поля. ИЛ, 1962.
6. И. М. Тетельбаум. Электрическое моделирование. ГИФМЛ, 1959.
7. В. С. Лукошков. Моделирование источников поля в электролитической ванне при решении задач математической физики. Сб. «Электротехника», 1959, № 7, 8.
8. Г. М. Герштейн и И. Н. Салий. О дискретной аппроксимации непрерывной функции на границе области при электрическом моделировании. «Электричество», 1967, № 11.
9. Г. А. Рязанов. Опыты и моделирование при изучении электромагнитного поля. «Наука», 1966.
10. П. М. Егоров. Экспериментальное исследование потенциальных полей посредством конформно-преобразовательных моделей. «Электричество», 1954, № 3.