ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА имени С. М. КИРОВА

Том 149 1966

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ МАШИН И ПЕРСПЕКТИВА ИХ РАЗВИТИЯ

А. А. ВОРОБЬЕВ, А. Ф. КАЛГАНОВ, В. В. ПАЦЕВИЧ

(Представлена научным семинаром научно-исследовательского института высоких напряжений)

Бурное развитие науки и техники в современный период характеризуется не только стремительным прогрессом в их новейших областях, но и возрождением на более высоком уровне ранее намечавшихся, а затем отвергнутых или забытых открытий, явлений, процессов.

Одним из примеров последней тенденции является возрождение интереса к электростатическим машинам (ЭСМ).

Слабое развитие электростатических машин, появившихся почти на два столетия ранее электромагнитных, объяснялось отсутствием решения основной проблемы их, как преобразователей одного вида энергии в другой, — проблемы получения высокой удельной электромеханической мощности, приходящейся на единицу объема или веса машины. В основном это было связано с отсутствием до последнего времени научно-технических основ решения вопросов максимальной концентрации энергии электрического поля в движущихся системах и отсутствием необходимых материалов, таких, например, как электрически и механически высококачественных диэлектриков.

Достигнутый к настоящему времени прогресс в области создания новых твердых диэлектриков с высокими электрическими и механическими свойствами, прогресс в области изучения электрических свойств газообразных, жидких и твердых диэлектриков и их поведения в сильных электрических полях в значительной степени способствовали решению указанных выше вопросов. Большое влияние на процесс развития электростатических машин оказало установление широкой аналогии между электростатическими и электромагнитными машинами. Эта аналогия, с одной стороны, является отражением единства электромагнитного поля; с другой стороны, она отражает специфические явления, связанные с различными сторонами единого электромагнитного поля.

Установление аналогии между электростатическими и электромагнитными машинами позволило с научных позиций оценить место электростатических машин в ряду других преобразователей механической энергии в электрическую, а также определить условия и пути улучшения энергетических характеристик электростатических машин. ЭСМ — это электрическая машина, в которой вместо электромагнитной индукции используется магнитно-электрическая индукция.

Основное условие высокой энергетической эффективности электростатических машин сводится к получению высокой удельной мощности, сравнимой с удельной мощностью электромагнитных машин в сопоста-

вимых условиях. При этом если удельная энергия магнитного поля электромагнитной машины зависит в основном от величины магнитной индукции, т. е. от магнитной проницаемости магнитопровода, то удельная энергия электрического поля электростатической машины определяется величиной напряженности этого поля.

Необходимость обеспечения высоких напряженностей электрического поля и концентрации его энергии определили и научные принципы конструирования электростатических машин, как то: жесткая роторная система и статор из полупроводящего материала, обеспечивающие равномерное распределение поля; использование сжатых газов или вакуума и малых, но строго определенных зазоров, способствующих повышению электрической прочности среды, и т. п.

Нельзя не отметить, что исключительно большое влияние на развитие электростатических машин оказали работы советских ученых (акад. А. Ф. Иоффе и др.).

Усиленный интерес, проявляемый в настоящее время к электростатическим машинам, не случаен. Дело в том, что такие машины обладают рядом свойств и преимуществ, присущих только им и которые во многих случаях вызывают необходимость отдать им предпочтение.

Во-первых, электростатические машины могут непосредственно вырабатывать или потреблять ток высокого напряжения на сотни тысяч и миллионы вольт. При использовании их в качестве силовых установок отпадает, следовательно, необходимость в повысительных или понизительных трансформаторах.

Во-вторых, электростатические машины по своей природе наиболее приспособлены к тому, чтобы вырабатывать или потреблять постоянный ток высокого напряжения. В этом случае отпадает надобность в выпрямительных устройствах.

В-третьих, электростатические машины теоретически представляется возможным создать на такие же мощности, как и электромагнитные машины, но с большей удельной мощностью на единицу объема и веса. Это объясняется тем, что поле в зазоре ЭСМ, вследствие своей прерывности, не нуждается в потокопроводе и может быть сосредоточено в большей части объема, занимаемого машиной при ее дисковом исполнении.

Из изложенного выше вытекает, что с использованием электростатических машин возможно значительно облегчить решение проблемы дальней передачи электрической энергии, электровооружения железнодорожного транспорта и других задач с огромным экономическим эффектом. Практически благодаря тем затратам научной мысли и тому вкладу промышленности, которые были реализованы, в настоящее время определенное развитие получили электростатические машины малой мощности, преимущественно как электростатические генераторы (ЭСГ). Возможность получения высокого постоянного напряжения с малой пульсацией, достигающей десятых и сотых долей процента, делает ЭСГ незаменимым для ускорительной техники, электроники, радиационной химии, в лабораторной и контрольно-измерительной аппаратуре и т. п.

Необходимо отметить определенные преимущества ЭСГ перед другими источниками высокого напряжения. Сейчас во многих случаях для получения высокого напряжения используются каскадно-вентильные установки, или так называемые каскадные генераторы. И они успешно зарекомендовали себя, будучи построенными на напряжение до нескольких миллионов вольт и ток до нескольких миллиампер, имея в ряде случаев лучшие удельные характеристики по сравнению с ЭСГ. Однако как только речь заходит о больших токах, каскадные генераторы вынуждены уступать свое место электростатическим генераторам. Поэто-

му, например, в радиационной химии, требующей установок высокого напряжения мощностью в десятки киловатт, видят путь развития именно через ЭСГ. К этому нужно добавить также, что ЭСГ оказываются непревзойденными по стабильности высокого напряжения, оценивающейся, как уже отмечалось, в сотые доли процента. Как маломощный источник постоянного высокого напряжения с малыми пульсациями, ЭСГ имеет одновременно малую энергоемкость, что обеспечивает почти полную безопасность его применения там, где неизбежны или возможны частые короткие замыкания.

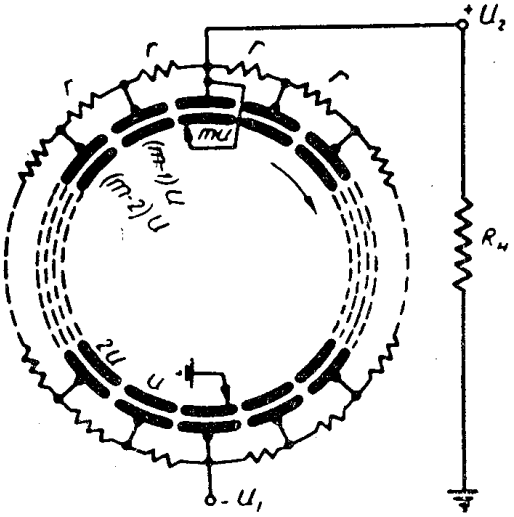

Рис. 1. Схема ЭСГ с каскадным соединением транспортеров-проводников.

Из различных типов ЭСГ преимущественное развитие в настоящее время получают емкостные генераторы, разделяющиеся на два основных класса: ЭСГ с транспортерами — проводниками (ЭСГП) и ЭСГ с транспортером-диэлектриком (ЭСГД). В конструктивном отношении емкостные ЭСГ в большинстве случаев являются вращающимися машинами дискового или цилиндрического исполнения. При этом проводящие транспортеры имеют форму секторов диска, сегментов цилиндра или форму стержней. На рис. 1 приведена схема ЭСГП в каскадном соединении.

В ЭСГ с диэлектрическим транспортером на смену ленте пришли цилиндры. Схема цилиндрического ЭСГД представлена на рис. 2.

Хотя в основе действия емкостных ЭСГ лежит один и тот же принцип изменения емкости системы заряженных сплошных тел, каждый их класс имеет свои специфические особенности, определяющиеся в основном характером коммутирующих устройств. Они различаются также по своим энергетическим возможностям. Так, ЭСГ с транспортерами-проводниками с ограниченным числом транспортеров имеет максимальную мощность, вдвое меньше максимальной мощности генератора с диэлектрическим ротором при прочих равных условиях.

Проведенные нами теоретические исследования по определению рациональной конструкции ЭСГ показали, что мощность ЭСГ с транспортерами-проводниками возрастает вдвое, т. е. уравнивается с мощностью ЭСГ с диэлектрическим ротором, если число транспортеров-проводников увеличить до бесконечности [1]. Было показано, что при прочих равных условиях (габариты, форма исполнения и т. п.) ЭСГ с транспортером-диэлектриком развивает наибольшую удельную мощность по сравнению с другими типами ЭСГ. Это объясняется тем, что в ЭСГД электрическое поле наиболее равномерно, и силы электрического поля используются с наибольшей эффективностью во времени и в пространстве.

К условиям, которые характерны для ЭСГД, приближаются условия, достигаемые в ЭСГ с транспортерами-проводниками, запеченными в диэлектрик.

С практической точки зрения преимущественный тип ЭСГ определяется возможностями его осуществления, его предназначением и другими внешними или внутренними факторами.

В настоящее время наилучшую практическую разработку получили ЭСГ с цилиндрическим диэлектрическим ротором (рис. 2). Например, французская фирма «Самес» уже несколько лет серийно выпускает около двух десятков типов роторных ЭСГД на напряжение от 80 до 600 кв и ток от 0,3 до 40 ма, характеризующихся большой стабильностью напряжения, сравнительно большим сроком службы (около 10 тыс. часов), простотой и безопасностью обслуживания.

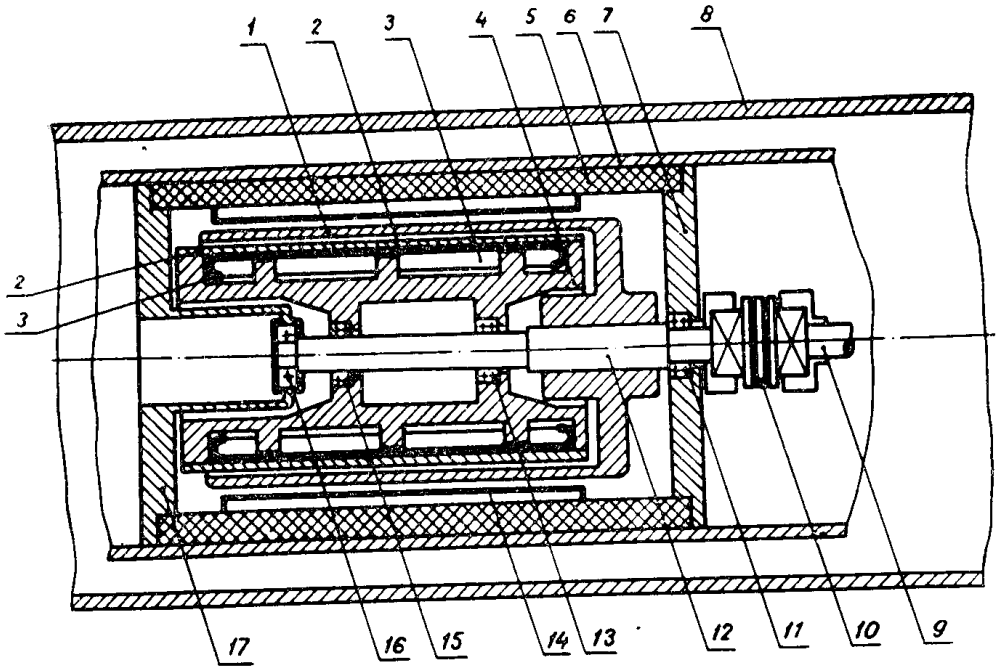

Рис. 2. ЭСГ с транспортером-диэлектриком цилиндрического типа.
1 — ротор, 2 — цилиндрический статор, 3 — индуктор, 4 — тело статора, 5 — диэлектрический каркас, 6— диэлектрический экран, 7, 17— фланцы, 8— металлический кожух, 9 — приводной вал, 10 — муфта, 11, 13, 15, 16 — подшипники, 12 — вал ротора, 14 — ионизатор (лента-лезвие).

Цилиндрическое исполнение роторных ЭСГД не позволяет, однако, рассчитывать на получение больших удельных и абсолютных мощностей из-за малого отношения площади рабочих поверхностей к общему объему, занимаемому генератором, и из-за ограничения в габаритах.

Повысить отношение площади к объему позволяет дисковое исполнение ЭСГ, но для ЭСГД эффект значительно ослабляется необходимостью снабжать каждый диск коммутационными приспособлениями. Для дискового исполнения лучше приспособлены ЭСГ с транспортерами-проводниками. Именно этим фактом можно, по-видимому, объяснить то, что некоторые американские фирмы проектируют или уже строят дисковые ЭСГП на напряжение более миллиона вольт и мощностью в несколько десятков киловатт, предназначая их в первую очередь для радиационной химии [2].

С другой стороны, разработка ЭСГ с транспортерами-проводниками наталкивается на трудности нового порядка. Во-первых, опыт работы с ЭСГП показывает, что щеточно-коллекторная система коммутации, неизбежно используемая в генераторах постоянного тока, не удовлетворяет условиям длительной работы. Возникающее искрение вызывает разъедание контактов, что приводит к засорению металлической пылью рабочей среды и, следовательно, к ухудшению энергетических характеристик генератора. Во-вторых, еще не решены многие важные

теоретические вопросы, касающиеся методов расчета ЭСГП, условий естественной перезарядки в них и т. п.

В ЭСГ, как и в электромагнитных машинах, наблюдается реакция якоря, вызывающая уменьшение напряжения генератора с увеличением его тока. Впервые этот вопрос достаточно подробно для своего времени исследован акад. А. Ф. Иоффе с сотрудниками [3]. Было показано, что причиной этого являются так называемые паразитные емкости. Позднее более детально влияние паразитных емкостей изучалось французами [4]. При этом А. Ф. Иоффе с сотрудниками учитывали только паразитную емкость на землю, а французы рассмотрели только ЭСГ с минимальным числом транспортеров, равным двум. Поэтому практически в большинстве случаев электрический расчет ЭСГ производился на основе самых общих закономерностей, когда ток генератора подсчитывался по формуле

$$I_0 = 2mn\,C_1U_1 = g_0U_1, \tag{1}$$

а напряжение оценивалось приближенно и служило лишь ориентиром для сравнения с реально получаемым. В вышеприведенном уравнении C_1 — полезная емкость одного транспортера, m — половина числа транспортеров, n — число оборотов ротора в секунду, U_1 — напряжение возбуждения. В настоящее время, когда корона в ЭСГ устраняется приданием транспортерам соответствующих размеров и формы, напряжение ЭСГ определяют достаточно точно по электрической прочности используемой среды и основным размерам генератора. Но проблема расчета, вообще говоря, никогда не упиралась и не упирается в определение напряжения. Поскольку напряжение — фиксированная в максимуме величина для данного ЭСГ, расчет ЭСГ сводится к определению его максимального рабочего тока, или к определению его габаритов по заданному рабочему току.

На основе развития идей акад. А. Ф. Иоффе нами получена уточненная формула для тока ЭСГП, которую можно распространить также и на ЭСГД:

$$I = \delta g_0 (U_1 - \alpha U_н). \tag{2}$$

Здесь δ — коэффициент, учитывающий явление перезарядки или недозарядки,

α — коэффициент, учитывающий реакцию якоря,

$U_н$ — напряжение нагрузки ЭСГ.

Возможно несколько путей использования уравнения (2). Первый путь — практический. Оценивая из предыдущих опытов значения коэффициентов δ и α для отдельных типов ЭСГ, как это практикуется в машиностроении, можно рассчитать соответствующий тип ЭСГ на требуемую мощность. Точность расчета намного повышается.

Второй путь — аналитический, но также приводящий к практически важным результатам. Оценивая сущность того, что изображают коэффициенты δ и α, можно отыскать средства управления ими с целью повышения энергетической эффективности ЭСГ. Из (2) видно, что для увеличения тока необходимо иметь возможно большей величину δ и возможно меньшей — величину α. Как показали теоретические исследования схем генераторов по рис. 1, значения коэффициентов δ и α сложным образом зависят от соотношения отдельных частичных емкостей ЭСГ, т. е., в конечном счете, от размеров, формы и взаимного расположения элементов ротора и статора, а также и от числа этих элементов [5]. Показано, в частности, что перезарядка в ЭСГП с большим числом элементов обязана наличию емкости между соседними элементами ротора и что, например, при равенстве этой емкости с полезной (между элементами ротора и статора) коэффициент δ равен примерно 2. Даль-

нейшее увеличение отношения этих емкостей вызывает лишь незначительное увеличение δ. Показано также, что дополнительный учет паразитных емкостей транспортеров на землю «вызывает» уменьшение коэффициента δ.

Практические результаты, вытекающие из исследований ЭСГ через частичные емкости, состоят в том, что этот путь позволяет реально оценить эффективность различных типов ЭСГ. На этом пути получены, в частности, доказательства высокой энергетической эффективности ЭСГ с запеченными стержнями и большое число практических рекомендаций по конструированию последних. Можно даже сказать, что в настоящее время это наиболее плодотворный путь дальнейшего исследования и разработки ЭСГ.

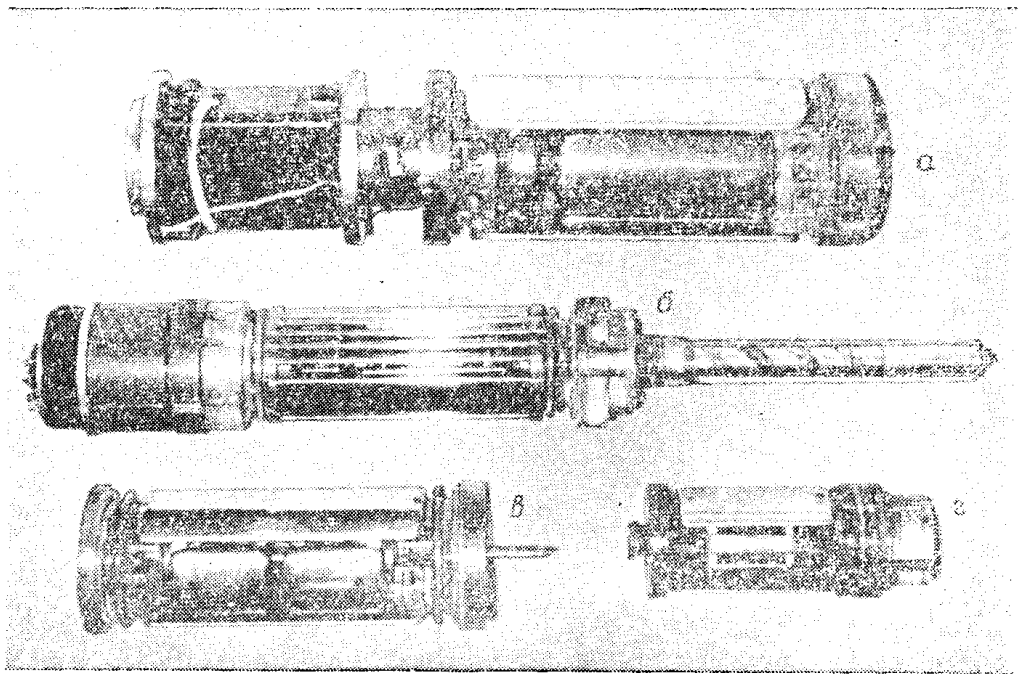

Рис. 3. Некоторые типы ЭСГ, выполненные в Томском политехническом институте а) — самовозбуждающийся ЭСГП на 50 кв, 120 мка; б) — стержневой ЭСГП на 100 кв, 100 мка; в) — ЭСГП с двойным ротором на 120 кв; г) — электростатический генератор зажигания на 21 кв.

На рис. 3 приведены фотографии ряда выполненных нами малогабаритных ЭСГП, послуживших нам моделями для проверки как теоретических, так и конструктивных разработок. Наиболее трудным оказалось решение вопросов контактной коммутации, не обеспечивающей длительного срока службы ЭСГ. Более успешными оказались опыты с ЭСГП с коронной коммутацией. Использованный для этих опытов ЭСГП изображен на рис. 4. Генератор имеет дисковое исполнение. В качестве транспортеров использованы тонкие проволочки U-образной формы, запеченные в диэлектрик. Заряды на транспортеры — проволочки (в опытном генераторе число их равнялось 200) наносились с помощью короны, создаваемой ионизаторами в виде тонких пластинок.

Небезынтересно отметить стремление некоторых исследователей обойти вопросы коммутации в ЭСГ использованием генераторов переменного тока с последующим выпрямлением [6]. В специфических условиях космоса, когда требуются не очень высокие напряжения и когда возможно достижение высоких скоростей ротора в вакууме, этот путь

может оказаться целесообразным, но, как нам представляется, его нельзя признать всеобщим, определяющим направление развития ЭСГП. Необходимы дальнейшие исследования вопросов коммутации в ЭСГП.

До сих пор мы рассматривали ЭСГ, предназначенные для работы в сжатых газах или вакууме. В поисках новых возможностей повышения удельных мощностей ЭСГ в литературе все чаще рассматривается вопрос об использовании других диэлектрических сред, таких, как жидкие и твердые диэлектрики с большой диэлектрической проницаемостью. Использование таких сред привело бы к революции в ЭСГ-строении, но пока этот вопрос не вышел за рамки чистых идей или разведочных экспериментов [7—9].

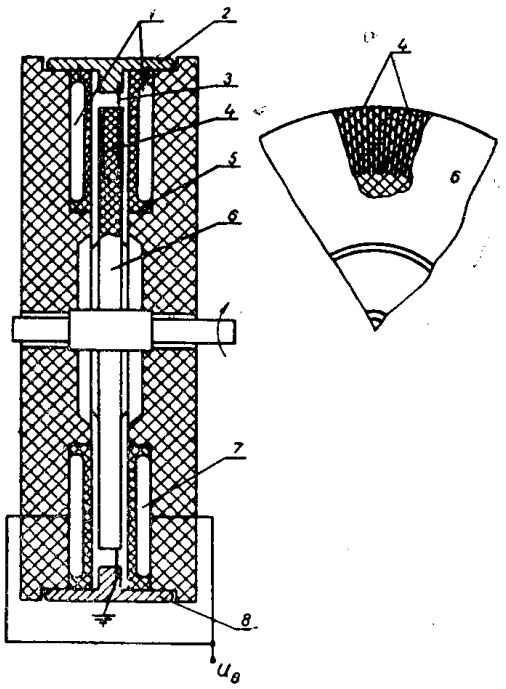

Рис. 4. Дисковый ЭСГП с увеличенным числом транспортеров.
1, 7 — индукторы, 2, 8 — щеткодержатели, 3 — ионизатор, 4 — транспортеры-проволочки U-образной формы, 5 — полупроводящий слой статора, 6 — ротор.

Перспективы ЭСГ как высоковольтных аппаратов или как мощных источников энергии представляются огромными. Об этом можно судить как по богатству идей в отношении будущего их развития, так и по уже достигнутым результатам. Широка область их применения, отдельные примеры которой мы уже приводили. Особенно велика ближайшая перспектива использования ЭСГ в электронно-ионной технологии. Как известно, технология обработки изделий в электрическом поле получает сейчас самое широкое распространение ввиду большой ее эффективности, а в ряде случаев и незаменимости. Электростатические машины и аппараты по самой природе как бы предназначены для использования их в этой области. Задача состоит в том, чтобы поставить теоретические исследования и практическую разработку ЭСГ на широкую и прочную основу.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Ф. Калганов и В. В. Пацевич. Известия вузов «Электромеханика», № 8, 917, 1963.
2. Engineer **209**, № 5426, 152, 1960.
3. А. Ф. Иоффе. Ж. Т. Ф. **9**, № 23, 2071, 1939.
4. R. Morel, Contribution à l'étude rationelle des machines électrostatiques, Grenoble, 1948 (диссертация).
5. В. В. Пацевич. Некоторые вопросы теории и расчета ЭСГ с транспортерами-проводниками, диссертация, г. Томск, 1964.
6. J. G. Trump. Доклад на 102 Международном семинаре национального центра научных исследований Франции, Гренобль, 1960.
7. N. J. Felici. Доклад на 102 Международном семинаре национального центра научных исследований Франции, Гренобль, 1960.
8. Л. С. Полотовский. Емкостные машины постоянного тока высокого напряжения, Госэнергоиздат, 1960.
9. В. Л. Лавровский. Проблема емкостного генератора большой мощности для целей энергетики, доклад на IV Межвузовской конференции по электронным ускорителям, Томск, 1962.