УДК 621.313

В. Г. ДАНЬКО, д-р техн. наук,
А. И. СТАНКЕВИЧ, канд. техн. наук, *С. М. КОЖЕМЯКИН*

ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В РАЗРАБОТКЕ СТАТОРОВ КРИОТУРБОГЕНЕРАТОРОВ

При разработке криотурбогенераторов (КТГ) приходится решать две основные проблемы — создание криогенной обмотки возбуждения и статора с обмоткой, расположенной в немагнитной зоне, который имеет цилиндрический шихтованный сердечник (ШС) или электромагнитный экран (ЭМЭ) для формирования магнитного потока и ограничения потоков рассеяния.

В отличие от генераторов традиционной конструкции, возникает ряд качественно и количественно новых явлений, связанных с тем, что обмотка, вынесенная в зазор, попадает в поле действия основного магнитного потока. Интенсивность тепловыделений в ней и в ЭМЭ (по сравнению с ШС) возрастает, многократно действующие электродинамические силы увеличиваются и меняется характер переходных процессов. В связи с этим представляют интерес возможные способы охлаждения статора (обмотки, ШС или ЭМЭ), целесообразность применения криогенного ЭМЭ, преимущества и недостатки ШС и ЭМЭ, влияние полюсности, уровень напряжения и влияние его на конструкцию обмотки, крепление обмотки статора в немагнитном слое.

В генераторах традиционной конструкции охлаждение обмотки и сердечника статора, как правило, воздушное, принудительное. Повышение коэффициента использования машины в этом случае можно получить за счет перехода к непосредственному жидкостному охлаждению обмотки статора, сохраняя воздушное охлаждение сердечника. Такая компановка системы охлаждения приемлема и для КТГ, однако она сложнее по сравнению с воздушной системой охлаждения. Поэтому для КТГ большой мощности целесообразно провести разделение зоны статора и зоны ротора, выделив зону статора в отдельную замкнутую цилиндрическую полость, причем по мере снижения температурного уровня хладагента (перехода, например, к азотному или гелиевому охлаждению) замкнутый объем может приобретать форму криостата. Выделение зоны статора в отдельный объем позволяет применить жидкостное или жидкостно-испарительное охлаждение всего статора в целом. Применение такой системы охлаждения позволяет существенно упростить конструкцию обмотки статора, интенсифицировать охлаждение сердечника статора или ЭМЭ. Последнее особенно важно, так как уровень удельных тепловыделений в ШС и их отвод с помощью воздушного охлаждения трудно реализовать.

Как уже указывалось, в КТГ для формирования и ограничения магнитного потока в статоре могут устанавливаться как ШС, так и ЭМЭ. Их основные характеристики следующие. ШС изготовляется из электротехнической стали и имеет радиальный размер h_c не менее $B_\delta R_0/pB_н K_з$, где B_δ, $B_н$ — рабочая индукция и индукция насыщения; R_0 — средний радиус расположения обмотки статора; p — число пар полюсов; $k_з$ — коэффициент заполнения сердечника электротехнической сталью. Потери на гистерезис и от вихревых токов распределены практически равномерно по объему сердечника. Уровень поверхностных потерь от высших гармоник магнитного поля относительно невелик, поэтому, за исключением торцовой длины, охлаждение ШС не представляет сложности. Однако следует отметить, что индукция и уровень потерь в ШС почти не зависит от температуры и масса ШС не уменьшается, а энергетические затраты на его охлаждение (учитывая неизменные потери) резко возрастают.

Радиальный размер ЭМЭ $h_э$ зависит от удельного сопротивления материала, из которого он изготовлен. Должно выполняться условие $h_э \geqslant 3\sqrt{\rho}/\sqrt{2\pi f \mu}$, где μ, ρ — магнитная проницаемость и удельное сопротивление материала ЭМЭ (обычно медь или алюминий); f — частота. Сопоставление радиальных размеров ЭМЭ и ШС для КТГ показывает, что при жидкостно-азотном охлаждении ЭМЭ может оказаться предпочтительнее ШС.

Размещение обмотки статора в воздушном зазоре обеспечивает возможность исполнения ее для более высоких напряжений. Рассмотрим две тенденции исполнения статорных обмоток КТГ. Первая основана на традиционной конструкции синхронного генератора. Здесь увеличение количества меди в активной зоне приводит к существенному удлинению лобовых частей, что не мешает иметь в этих обмотках повышенный коэффициент заполнения медью и высокую линейную нагрузку. Использование хорошо изученных и освоенных промышленностью видов изоляции позволяет поднять уровень напряжения в обмотке статора до 24...30 кВ.

Вторая тенденция предусматривает принципиально новую геометрию обмоток, вынесенных в зазор. Это плоская спиральная обмотка в КТГ (США) мощностью 300 МВА. Она состоит из 6 фаз, каждая из которых занимает в пространстве спиральную зону в 300°. Для создания отдельными фазами обмотки одинакового по величине поля в зазоре, их геометрия должна быть соответствующим образом рассчитана. К основным преимуществам спиральных обмоток относятся: упрощение конфигурации катушек обмоток статора и технологии их изготовления; отсутствие в катушке резких перегибов, затрудняющих выполнение обмотки на высокое напряжение; выполнение высоковольтной изоляции без снижения коэффициента заполнения активной зоны; выполнение лобовых частей катушек без отгиба, что позволяет уменьшить диаметр статора.

Проведенный анализ возможного повышения линейной нагрузки и напряжения статора КТГ с целью снижения массогабаритных показателей на единицу мощности показал, что есть апробированные и перспективные системы охлаждения как статора в целом, так и обмотки статора в отдельности, позволяющие существенно интенсифицировать их работу; целесообразно конструктивно выделить полость статора и тем самым упростить решение проблемы охлаждения и высоковольтной изоляции; представляет интерес создание статора с криогенным ЭМЭ; по мере роста напряжения на обмотке статора можно перейти к новым видам обмотки, позволяющим расположить ее более технологично и с большим коэффициентом заполнения медью активной зоны; имеется целый ряд конструктивных решений, а также идей, по надежному креплению обмотки статора в зазоре.

Поступила в редколлегию 21.11.86

УДК 621.313

В. И. ОМЕЛЬЯНЕНКО, канд. техн. наук,
С. А. САПЕЛКИН, канд. физ.-мат. наук, *С. А. СЕРГЕЕВ*

РАСЧЕТ ИНДУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ УСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ ПОДВЕСКИ

В устройствах электродинамической подвески и направления экипажа высокоскоростного наземного транспортного средства с дискретной путевой структурой силы взаимодействия экипажных магнитов с путевыми контурами могут определяться в соответствии с энергетическим подходом следующим образом: $F_q = i_s(\partial M/\partial q \cdot J)$ (1), где i_s — магнитодвижущая сила поездного магнита; M — матрица-строка коэффициентов взаимоиндукции между поездным магнитом и цепочкой путевых контуров; J — матрица-столбец токов в цепочке путевых контуров. Матрицу J находим, решая систему линейных дифференциальных уравнений, составленных по второму закону Кирхгофа для магнитно-связанных контуров с током [1], и приводим к виду $(A \cdot J) = i_s M^T$ (2). Здесь A — квадратная матрица, элементы которой образованы из параметров только путевых контуров.

Как видно из (1), (2), поведение поддерживающего, направляющего и тормозного усилий во многом зависит от закона распределения потока взаимной индукции между контурами, а также его пространственных производных. Для расчета этих величин можно воспользоваться аналитическими выражениями, полученными в работах [2; 3], учитывая, что они справедливы лишь в случае равенства поперечных размеров поездных магнитов и путевых контуров, а также соосном расположении их в параллельных плоскостях. При осевом повороте магнита и боковом смещении его