

К ВЫБОРУ ИСПОЛНЕНИЯ УНИПОЛЯРНОГО ГЕНЕРАТОРА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Г. А. Сипайлов, А. Д. Чесалин

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин
и общей электротехники)

С целью интенсификации производственных процессов плавки и повышения качества металлов применяется электромагнитное перемешивание расплава. Для индукционного перемешивания применяются двух- или трехфазные индукторы, питаемые током низкой частоты ($0,3 \div 1,5$ гц) от преобразовательных установок, состоящих из 8—10 машин. При достаточно высоком выходном напряжении преобразовательных установок ($120 \div 230$ в) обмотки индукторов приходится выполнять из тонких трубок с большим числом витков. Непосредственное водяное охлаждение таких обмоток затруднительно из-за больших гидравлических потерь и опасности аварии из-за засорения каналов.

Униполярные генераторы (УГ) переменного тока позволяют получить токи низкой частоты большой силы и обеспечить плавную регулировку частоты в широком диапазоне. Низкое выходное напряжение УГ позволит уменьшить число витков обмотки индуктора перемешивателя и увеличить сечение медных трубок обмотки, что удешевит изготовление статора, снизит гидравлические потери в нем и аварийность от водяного охлаждения. Кроме того, применение УГ позволит снизить число машин в преобразовательных установках [1].

Для решения поставленных задач необходима разработка и исследование УГ переменного тока.

В настоящей работе производится выбор наиболее целесообразного исполнения УГ переменного тока на основе анализа известных в технической литературе данных и приводятся основные положения для их расчета.

В [1] предложено использовать в качестве УГ переменного тока УГ постоянного тока, возбуждаемый переменным током низкой частоты порядка 1—2 гц. Это предложение аргументировано тем, что при низких частотах в массивной магнитной системе потери в стали будут малы. Действительно, если при частоте 50 гц для массивной магнитной системы удельные потери в стали на единицу поверхности $\Delta p = 0,735$ квт/м², то при частоте 1 гц — $\Delta p = 0,104$ квт/м², а при частоте 0,1 гц — $\Delta p = 0,033$ квт/м². Расчет произведен для индукции $B = 1,4$ тл по выражениям, приведенным в [2].

Однако следует учесть, что в массивном магнитопроводе переменный магнитный поток распространяется в поверхностном слое, размеры которого зависят от глубины проникновения магнитного поля. Например, для стали ротора турбогенератора глубина проникновения магнитного поля при частоте 50 гц равна $\Delta = 0,00167$ м, при частоте 1 гц — $\Delta = 0,0116$ м,

при частоте 0,1 гц — $\Delta = 0,037$ м. Практически можно считать, что на глубине 3Δ магнитная индукция равна нулю. Поэтому изготовить УГ переменного тока с массивной магнитной системой на мощности в сотни кВт, какие необходимы для питания индукторов перемешивателей, не представляется возможным. Кроме того, массивная магнитная система как статора, так и ротора будет представлять собой для магнитного потока возбуждения короткозамкнутые витки, в которых потекут токи трансформаторных эдс, демпфирующие основной поток. Следовательно, необходима шихтовка магнитной системы статора и ротора как с целью равномерного распределения магнитного потока в магнитопроводе, так и с целью исключения токов трансформаторных эдс, даже для частот порядка 0,1—1 гц.

Можно привести следующие данные для толщины листов, из которых можно шихтовать магнитопроводы при низких частотах: при частоте 1 гц толщина листа 3—5 мм, для частоты 0,1 гц — 10—12 мм.

УГ переменного тока могут быть дисковые и цилиндрические. Судить о преимуществах того или иного исполнения, в связи с отсутствием в настоящее время исследований по униполярным машинам (УМ) переменного тока, можно по результатам анализа описаний изобретений [3] и, руководствуясь исследованиями, проведенными для УМ постоянного тока [4].

Известно [4], что дисковая УМ постоянного тока имеет значительно больший относительный вес, чем цилиндрическая. Это соотношение, очевидно, сохранится и для машин переменного тока. При большем весе стали у дисковой УМ на переменном токе будут больше потери на вихревые токи и гистерезис. Энергия на эти потери в УМ расходуется из цепи обмотки возбуждения, что приведет к уменьшению коэффициента усиления машины. Магнитопровод УМ переменного тока необходимо выполнять шихтованным, располагая листы в плоскостях, проходящих через ось машины. Осуществить такую шихтовку ротора дисковой УМ, обеспечив при этом достаточную механическую прочность дискового ротора, очень сложно. Поэтому рекомендуется изготавливать ротор из немагнитного электропроводящего материала в виде разрезного диска, представляющего собой колесо со спицами без внешнего обода. Расчленение стержней такого ротора на внешнем диаметре диска осуществляется для того, чтобы исключить токи от трансформаторных эдс, которые будут возникать при наличии сплошного кольца. Выполнение ротора из немагнитного материала приведет к значительному увеличению немагнитного промежутка магнитопровода и, следовательно, к увеличению габаритов обмотки возбуждения и всей машины.

Шихтованный ротор цилиндрической УМ переменного тока конструктивно более прост по сравнению с дисковой. Обмотка якоря цилиндрической машины состоит из стержней, уложенных в пазы шихтованного ротора, и конструктивно подобна беличьей клетке асинхронного двигателя. Вне магнитной цепи стержни соединены короткозамыкающим кольцом, а внутри машины выведены на своеобразный коллектор, состоящий из изолированных друг от друга секторсв. Расчленение стержней внутри машины устраняет короткозамкнутое кольцо для токов трансформаторной эдс. Выбором конфигурации стержней обмотки якоря можно обеспечить оптимальную величину расчетного воздушного зазора и соответственно обмотки возбуждения.

Из этих соображений предпочтительно цилиндрическое исполнение УГ переменного тока. Принципиально конструкция цилиндрического УГ переменного тока аналогична конструкции цилиндрического УГ постоянного тока. Однако работа на переменном токе обуславливает ряд особенностей.

Так как стержни обмотки якоря внутри машины разъединены, то количество одновременно работающих стержней определяется конструкцией токосъемного аппарата и зависит от числа зон съема в зональном токосъеме. При уменьшении числа зон съема уменьшается число одновременно работающих стержней. Кроме того, при переходе щетки в зональном токосъеме с одного стержня на другой будут возникать коммутационные явления, связанные с разрывом полного тока, что вызовет пульсации в кривой выходного напряжения. Выполнение обмотки якоря, а при необходимости и компенсационной обмотки по схеме, предложенной П. Клауди [5], уменьшит коммутационные явления, связанные с разрывами полного тока, и позволит уменьшить число зон съема зонального токосъема при одновременной работе всех стержней обмотки якоря.

Так как магнитопровод УГ переменного тока должен выполняться шихтованным, и шихтовка должна производиться в плоскостях, проходящих через ось машины, то встает вопрос о конструктивном выполнении и обеспечении достаточной механической прочности ротора. Цилиндрический ротор (рис. 1, а) можно склеить из клинообразных блоков (рис. 1, б). При частотах порядка 1 гц блоки можно заменить клинообразными пластинами (рис. 1, в). Клей, например, на основе эпоксидных смол в настоящее время широко применяются в промышленности и обес-

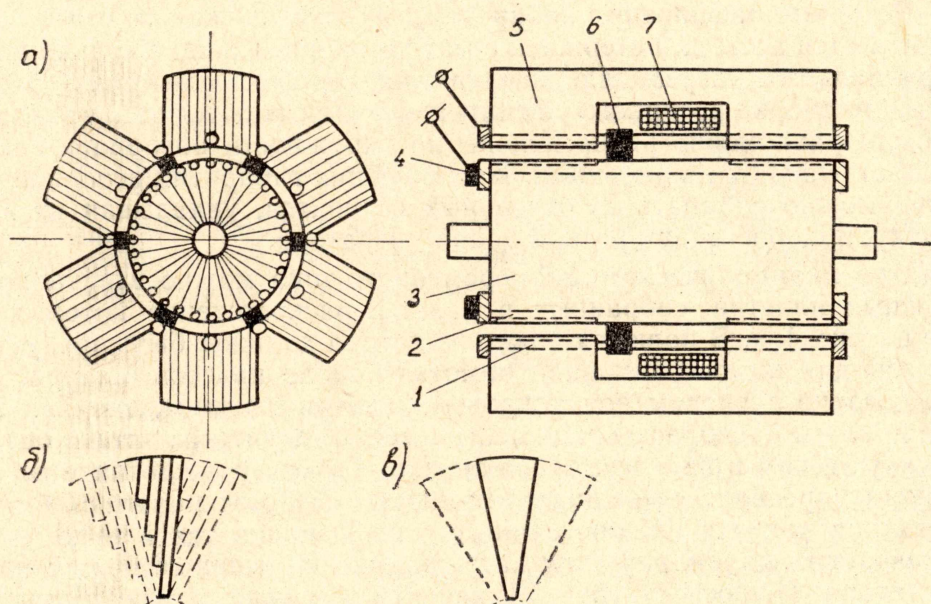


Рис. 1 а. Схема конструкции цилиндрического УГ переменного тока с гладким ротором: 1 — компенсационная обмотка, 2 — обмотка якоря, 3 — ротор, 4 — сплошной токосъем, 5 — статор, 6 — зональный токосъем, 7 — обмотка возбуждения

печивают достаточную прочность металлических соединений. Однако механическая прочность и надежность шихтованного ротора во многом будет зависеть от технологического процесса склеивания. Поэтому необходимы дополнительные мероприятия для обеспечения надежности ротора, например, установка бандажей. Для того, чтобы не образовывались короткозамкнутые витки, бандаж нужно выполнять из изоляционного материала. Применение изоляционного бандажа приведет к увеличению расчетного воздушного зазора и, следовательно, к увеличению мощности, потребляемой обмоткой возбуждения. Этого можно избежать, выполнив ротор генератора с роторными расширениями (рис. 2).

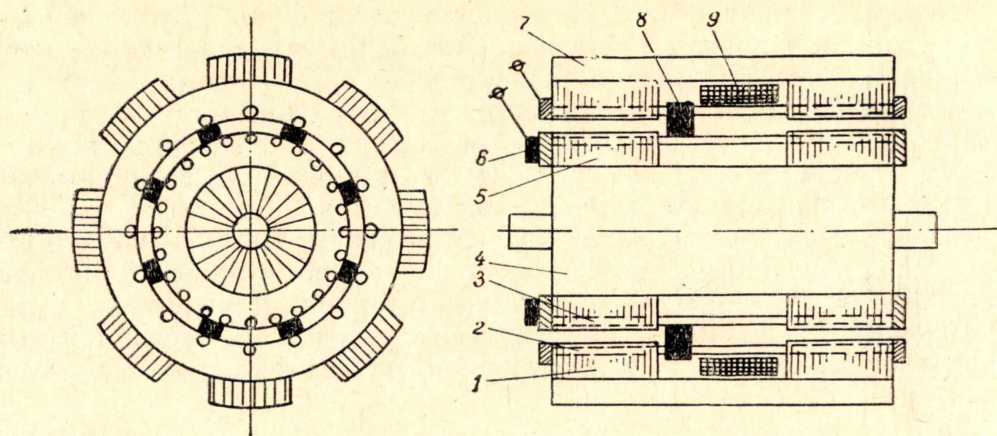


Рис. 2. Схема конструкции цилиндрического УГ переменного тока с роторными расширениями: 1 — полюс статора, 2 — компенсационная обмотка, 3 — обмотка якоря, 4 — ротор, 5 — роторное расширение, 6 — сплошной токосъем, 7 — ярмо статора, 8 — зональный токосъем, 9 — обмотка возбуждения

Роторные расширения, являясь несущей частью для обмотки якоря, одновременно будут механически скреплять радиально-шихтованный ротор. Роторные расширения набираются из штампованных колец, в которых имеются пазы для стержней обмотки якоря. Каждое кольцо имеет один радиальный разрез для исключения короткозамкнутого витка. Кольца при сборке роторного расширения укладываются так, чтобы разрезы были равномерно распределены по окружности роторного расширения, и стягиваются шпильками. При больших габаритах роторное расширение можно собирать из отдельных сегментов, укладывая их в перекрышку, подобно ободу ротора гидрогенератора.

Статор цилиндрического УГ переменного тока можно выполнить из П-образных пластин, собранных в пакеты, расположение которых показано на рис. 1, а. В полюсах пакетов статора должны быть предусмотрены пазы для компенсационной обмотки. Число пакетов статора, очевидно, связано с числом зон токосъема внутри машины, так как последние должны располагаться в местах между пакетами, чтобы обеспечить доступ к ним в процессе эксплуатации. Поэтому число пакетов статора будет определяться конструктивными соображениями. Обмотка возбуждения как и у УМ постоянного тока выполняется в виде одной или нескольких цилиндрических катушек, расположенных между полюсами статора. Полюсы статора УГ переменного тока можно выполнить и в виде цилиндрических колец, изготовленных аналогично роторным расширениям и запрессованных в расточку пакетов ярма статора (рис. 2). Пакеты статора шихтуются из отдельных пластин и крепятся на корпусе машины.

Таким образом, цилиндрический УГ переменного тока можно выполнить с роторными расширениями и без них. По аналогии с УГ постоянного тока, очевидно, относительный вес УГ с гладким ротором будет меньше относительного веса УГ с роторными расширениями при одинаковых токах якоря и окружных скоростях. Но ротор с роторными расширениями будет надежней. Возможности той или иной конструкции ротора можно оценить точнее в результате разработки и исследования образцов.

Расчет цилиндрического УГ переменного тока можно вести, руководствуясь основными расчетными соотношениями, данными Б. Л. Алиевским в [6], с учетом особенностей выполнения обмотки якоря по схе-

ме П. Клауди [5]. Основное расчетное уравнение цилиндрического УГ переменного тока имеет вид

$$D = \sqrt[3]{\frac{P_э}{\sigma \lambda n}}, \quad (1)$$

где D — диаметр ротора (роторного расширения для УГ с роторными расширениями), м; $P_э$ — электромагнитная мощность генератора, ква; σ — коэффициент использования генератора, $\frac{\text{квa}}{\text{м}^3 \cdot \text{об/сек}}$; λ — конструктивный коэффициент; n — скорость вращения ротора, об/сек.

При наличии компенсационной обмотки можно принять эдс якоря при нагрузке, равной эдс холостого хода, действующее значение которой равно

$$E = 2,22 D l B_{m\delta} n, \quad (2)$$

где l — активная длина ротора на один полюс, м; $B_{m\delta}$ — амплитудное значение магнитной индукции в воздушном зазоре, тл.

Так как обмотка якоря выполнена по схеме П. Клауди, то число одновременно работающих стержней обмотки якоря не будет зависеть от числа щеток зонального токосъема и будет равно полному числу стержней обмотки N . Тогда при сечении стержня q_c и плотности тока в нем $j_я$ действующее значение тока якоря

$$I_я = N I_c = N q_c j_я, \quad (3)$$

где $I_я = q_c j_я$ — ток в стержне. Отсюда линейная нагрузка генератора

$$A = \frac{I_я}{\pi D} = \frac{N I_c}{\pi D} \quad (4)$$

и электромагнитная мощность, принимаемая за расчетную,

$$P_э = E I_я \cdot 10^{-3}. \quad (5)$$

Выражение для конструктивного коэффициента λ цилиндрического УГ с гладким ротором дано в [6]. Для УГ с роторными расширениями

$$\lambda = 0,25 \frac{B_{mp}}{B_{m\delta}} (D_p^{*2} - d_v^{*2}), \quad (6)$$

где B_{mp} — амплитудное значение магнитной индукции в роторе;

$D_p^* = \frac{D_p}{D}$; $d_v^* = \frac{d_v}{D}$; D — диаметр роторного расширения; D_p — диаметр ротора; d_v — диаметр вала.

Для проведения дальнейших исследований на основе приведенных соотношений разработан и создан опытный образец компенсированного цилиндрического УГ переменного тока с роторными расширениями и половинным использованием активной длины ротора на ток 6300 а при напряжении на выходе 0,9 в.

На основании проведенного анализа можно заключить, что УГ переменного тока необходимо выполнять с шихтованной магнитной системой. Из известных исполнений и конструкций УГ переменного тока наиболее приемлемым, как и для УГ постоянного тока, следует признать цилиндрическое исполнение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Я. И. Дробинин, Т. Я. Дробинина. Униполярный генератор переменного тока. Труды УПИ, сб. № 156, 1967.
 2. И. А. Сыромятников. Режимы работы синхронных генераторов. Госэнергоиздат, 1952.
 3. Г. А. Сипайлов, А. Д. Чесалин. Униполярные электрические машины переменного тока. Устройства электропитания и электропривода малой мощности, т. 2, Изд-во «Энергия», 1970.
 4. А. И. Бертинов, Б. Л. Алиевский, С. Р. Троицкий. Униполярные электрические машины с жидкометаллическим токосъемом. Изд-во «Энергия», 1966.
 5. P. Klaudy Unipolarmaschine für Wechselstrom. Австрийский патент № 210514, кл. 21 d, 85, 1960.
 6. Б. Л. Алиевский. Униполярные генераторы переменного тока низкой частоты для питания устройств индукционного перемешивания расплавленных металлов. Труды конференции по униполярным электрическим машинам, Изд-во «Энергия», 1969.
-