

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ЗОНЕ ВЫВОДНЫХ ШИН ОБМОТКИ СТАТОРА ГИДРОГЕНЕРАТОРА-ДВИГАТЕЛЯ СВО 1255/255-40 УХЛ4 В РАЗНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

После ввода в эксплуатацию гидрогенератора-двигателя (ГД) СВО 1255/255-40 УХЛ4 станц. № 1 Днестровской ГАЭС на нём были отмечены повышенные нагревы конструктивных элементов, расположенных вблизи выводных шин обмотки статора. Нагреву подвергались упорные домкраты крестовины, площадки обслуживания домкратов, опорные конструкции выводных шин, металлическая опалубка "бочки" фундамента ГД, листы верхнего перекрытия.

Причиной повышенных нагревов являлись вихревые и циркуляционные токи, протекающие в конструктивных элементах от действия потоков рассеяния в рассматриваемой зоне. Под вихревыми токами подразумеваются токи, которые протекают и замыкаются внутри конструктивных элементов, а циркуляционные токи – токи, которые перетекают (циркулируют) от одной детали в другую. Если вихревые токи обусловлены переменным магнитным полем, пронизывающим конструктивный элемент, то циркуляционные токи обусловлены действием магнитного поля в замкнутом контуре, состоящем из ряда конструктивных элементов, электрически соединённых между собой. В электрически изолированных токопроводящих деталях действуют только лишь вихревые токи. Как правило, при протекании циркуляционных токов в деталях одновременно протекают и вихревые токи, взаимодействуя между собой. По характеру выделения потерь циркуляционные токи отличаются от вихревых тем, что могут быть причиной нагрева в зоне соединения деталей из-за повышенного переходного сопротивления при относительно небольших токах в контуре.

Для снижения магнитных потоков рассеяния было принято решение об установке электромагнитного экрана. С целью разработки оптимальной конструкции экрана проведено экспериментальное исследование магнитного поля в зоне выводных шин обмотки статора. Для измерения магнитной индукции в указанной зоне устанавливались измерительные планки с преобразователями, расположенными в двух взаимноперпендикулярных плоскостях, позволяющих определять радиальные и тангенциальные составляю-

щие магнитной индукции по отношению к оси выводной шины.

Было установлено четыре планки с измерительными преобразователями в зоне нулевых выводов. Схема установки планок в зоне выводных шин обмотки статора показана на Рис. 1. Две планки устанавливались в верхней части камеры холодного воздуха: одна напротив оси выводных шин фазы Ш, а другая – напротив середины, между выводными шинами фаз Ш и У2. Расстояние от плоскости шин до планок составило около 70 см. Две другие планки были установлены в верхней части проёма под шины в "бочке" фундамента гидрогенератора-двигателя аналогично, как и в камере холодного воздуха. Расстояние от плоскости шин до планок в зоне проёма составило 34 см. Расположение выводных шин и измерительных планок (вид сверху), а также обозначения выводных шин обмотки статора показаны на Рис. 2.

Для разрыва контуров циркуляционных токов три упорных домкрата и площадки их обслужива-

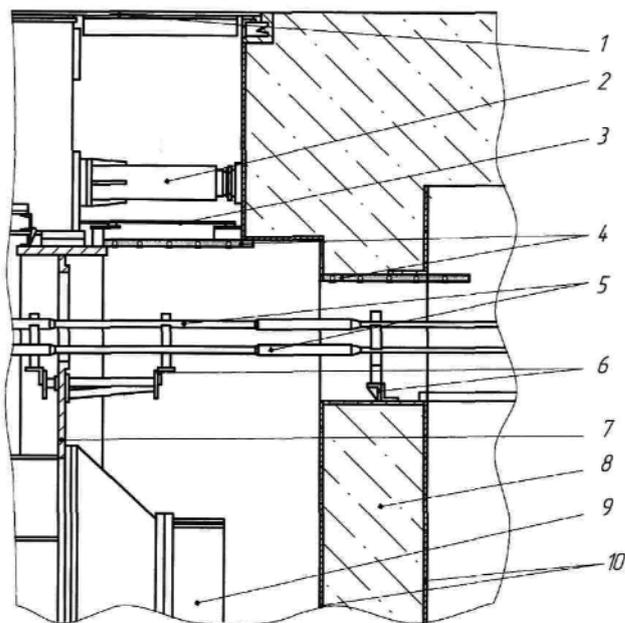


Рис. 1. Схема установки измерительных планок в зоне выводных шин обмотки статора (1 – Верхнее перекрытие, 2 – упорный домкрат, 3 – площадка для обслуживания домкрата, 4 – измерительные планки, 5 – выводные шины, 6 – опорные элементы крепления выводных шин, 7 – корпус статора, 8 – "бочка" фундамента, 9 – воздухоохладитель, 10 – опалубка "бочки" фундамента.

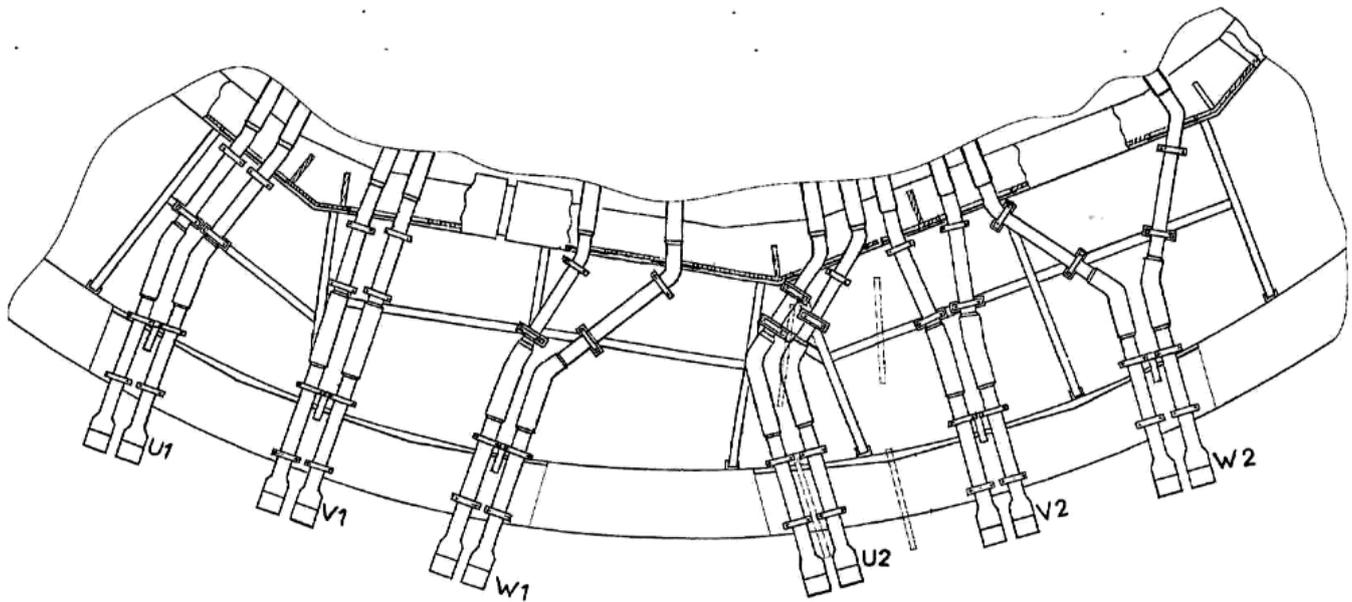


Рис. 2. Расположение выводных шин и измерительных планок, вид сверху (штриховыми линиями показаны места установки измерительных планок, U1, V1 и W1 – главные выводы, U2, V2 и W2 – нулевые выводы)

живания, расположенные в зоне выводных шин обмотки статора, были отизолированы. В дальнейшем упорный домкрат, расположенный напротив границы между главными и нулевыми выводами, был зашунтирован по току перемычкой.

Измерения составляющих магнитной индукции как при шунтированном, так и при дешунтированном домкрате, проведены при работе ГД в режимах генератора, двигателя и синхронного компенсатора с разным уровнем реактивной мощности (как выработки, так и потребления). При дешунтированном домкрате проведены также косвенные режимы работы гидрогенератора-двигателя: установившегося трехфазного короткого замыкания при разных токах статора и режим холостого хода при номинальном напряжении статора.

При проведении исследований в режиме установившегося трехфазного короткого замыкания с током статора, близком к номинальному, выполнено измерение составляющих магнитной индукции на разных расстояниях от шины Ш по направлению вверх и вниз переносным зондом — преобразователем.

В результате проведенных исследований было установлено, что составляющие магнитной ин-

дукции пропорциональны току статора. В режиме холостого хода гидрогенератора-двигателя при номинальном напряжении статора потоки рассеяния в зоне выводных шин обмотки статора практически отсутствуют, значения составляющих магнитной индукции не превышают 1 Гс.

Исследования показали, что на всех измерительных планках радиальная и тангенциальная составляющие соизмеримы между собой.

Максимальное значение тангенциальной составляющей магнитной индукции измерено в камере холодного воздуха планкой, установленной напротив выводной шины фазы Ш, её значение составило 96 Гс (радиальная составляющая магнитной индукции в этой зоне — 77 Гс). На планке, установленной в камере холодного воздуха напротив середины шин фаз XU1 и U2, максимальное значение радиальной составляющей магнитной индукции — 54 Гс (тангенциальная составляющая магнитной индукции в указанной зоне составила 44 Гс).

На планках, установленных в проёме "бочки" фундамента гидрогенератора-двигателя, максимальное измеренное значение магнитной индукции составило 62 Гс, причём, на планке напротив шины фазы Ш — указанное значение имеет тан-

Таблица 1. Результаты измерения составляющих магнитной индукции вблизи выводных шин фазы Ш в камере холодного воздуха, Гс.

Направление точек измерений	Номера точек измерений и обозначения составляющих магнитной индукции											
	1			2			3			4		
	О	К	Т	О	К	Т	О	К	Т	О	К	Т
Вверх от шины	52	60	130	31	74	73	31	77	37	25	60	24
Вниз от шины	14	29	142	12	10	87	6	7	57	5	и	43

Примечания: 1. Обозначения О, К, Т - осевая, радиальная и тангенциальная составляющие магнитной индукции по отношению к оси выводной шины. 2. Точки измерения 1, 2, 3 и 4 расположены на расстояниях 5, 20, 40 и 60 см от поверхности шин, соответственно.

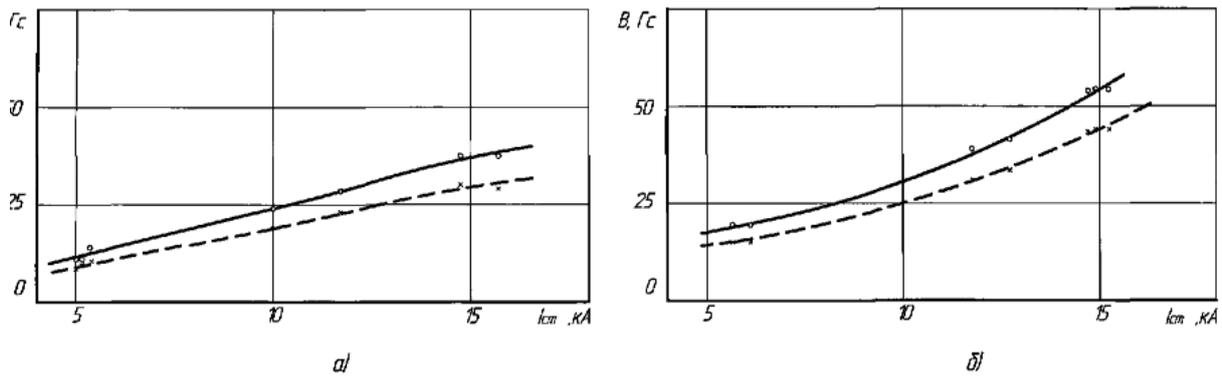


Рис. 3. Зависимость максимальных составляющих магнитной индукции, измеренных планкой, установленной на камере холодного воздуха напротив середины, между шинами фаз U2 и V2, от тока статора при дешунтированном (а) и шунтированном (б) домкрате (— — — радиальная составляющая, - - - — тангенциальная составляющая)

генциальная составляющая магнитной индукции, а на планке, установленной напротив середины между шинами фаз Ш и U2 — радиальная составляющая.

На Рис. 3 показана зависимость максимальных составляющих магнитной индукции, измеренных планкой, установленной в камере холодного воздуха напротив середины между шинами фаз 112 и U2, от тока статора.

При дешунтированном домкрате зависимость магнитной индукции от тока статора практически прямолинейная, и только при больших токах статора, близких к номинальным, просматривается некоторое снижение магнитной индукции по отношению к прямолинейной зависимости. При шунтировании домкрата начальный участок зависимости близок к прямолинейному, а при возрастании тока статора наблюдаются непропорциональный рост составляющих магнитной индукции. Такой характер зависимости магнитной индукции от тока статора характерен для всех планок кроме одной, установленной в камере холодного воздуха напротив шины фазы Ш. Для составляющих магнитной индукции, измеренных указанной планкой, шунтирование и дешунтирование домкрата практически не приводит к изменению величины и характера зависимости от тока статора, что можно объяснить расположением измерительной планки вблизи ферромагнитного конструктивного элемента — площадки обслуживания домкрата, которая шунтирует магнитный поток рассеяния от тока в шунте.

Неоднородность в зависимостях составляющих магнитной индукции от тока статора при шунтированном и дешунтированном домкрате объясняется тем, что магнитная индукция при шунтировании домкрата обусловлена двумя источниками: от тока в выводных шинах обмотки статора и от тока в шунтирующей перемычке, а при дешунтированном домкрате составляющие магнитной индукции обусловлены только лишь

током статора. То, что при шунтировании домкрата максимальные составляющие магнитной индукции возрастают на 25 — 50 %, указывает на противоположное направление тока в шунте по сравнению с током выводных шин.

Анализ показывает, что основной причиной возникновения циркуляционных токов в контуре: корпус статора — домкраты, шунтирующая перемычка — внутренняя опалубка "бочки" фундамента — дно камеры холодного воздуха, является тангенциальная составляющая магнитной индукции, пронизывающая указанный контур. Если бы выводные шины располагались по центру высоты камеры холодного воздуха, а магнитная проводимость для потоков рассеяния в верхней и нижней части камеры была бы одинакова, то суммарная тангенциальная составляющая магнитной индукции была бы равна нулю, и циркуляционный ток в указанном контуре отсутствовал.

В Табл. 1 приведены результаты измерения составляющих магнитной индукции, измеренные переносным зондом — преобразователем вблизи выводных шин фазы U2 при токе статора 15,68 кА в режиме установившегося трехфазного короткого замыкания.

Выводные шины обмотки статора расположены несимметрично по высоте, и, как показали результаты измерений вниз и вверх от шины (см. Табл. 1), в соответственных точках измерений тангенциальная составляющая магнитной индукции в направлении вниз от шины имеет большее значение, чем вверх от шины. Это объясняется влиянием ферромагнитных элементов, которые в верхней части расположены ближе к шинам и приводят к переходу тангенциальной составляющей магнитной индукции в радиальную и осевую составляющие в большей мере, чем в нижней части. В результате этого тангенциальная составляющая магнитной индукции в нижней части от шин превышает составляющую в верхней части и в контуре возникают циркуляционные токи, под



действием которых происходит дополнительный нагрев конструктивных элементов.

С учётом особенностей взаимодействия магнитных потоков рассеяния в зоне расположения выводных шин обмотки статора непропорциональный рост составляющих магнитной индукции при шунтированном домкрате от тока статора (см. Рис. 2) можно объяснить влиянием конструктивных элементов на перераспределение составляющих магнитной индукции. При небольшом токе статора и, следовательно, потоке рассеяния значение тангенциальной составляющей магнитной индукции в нижней части камеры больше, чем в верхней части за счёт её усиления конструктивными опорными элементами выводных шин. С ростом тока статора на перераспределение составляющих магнитной индукции начинают влиять конструктивные элементы, расположенные на большем расстоянии от шин. В верхней части камеры холодного воздуха — домкраты, площадки для обслуживания домкратов и т.д., а в нижней части — воздухоохладители. Степень влияния указанных элементов при разных значениях тока статора разная, из-за этого наблюдается непропорциональный рост составляющих магнитной индукции от тока статора при шунтированном распорном домкрате.

Анализ показывает, что в зоне расположения выводных шин тангенциальная составляющая магнитной индукции вдоль камеры холодного воздуха имеет максимальное значение на границе между главными и нулевыми выводами из-за того, что временный сдвиг между токами в соседних выводных шинах (фазы У1 и 112) составляет всего 60 электрических градусов. Это подтверждается зоной расположения повышенных нагревов конструктивных элементов верхнего перекрытия. Напротив границы между главными и нулевыми выводами расположено пространство между воздухоохладителями, что также способствует некоторому росту тангенциальной составляющей маг-

нитной индукции в нижней части камеры холодного воздуха, а, следовательно, и к возрастанию циркуляционного тока.

С учётом результатов исследований, для снижения циркуляционных токов, приводящих к нагреву конструктивных элементов, необходимо выравнивание тангенциальных магнитных потоков рассеяния над выводными шинами и под ними. С этой целью можно было бы в зоне между главными и нулевыми выводами, где указанные потоки максимальные, в пространстве под шинами установить электромагнитный экран для снижения магнитного потока в этой зоне, или в верхней части от шин установить магнитный шунт, который приведёт к возрастанию магнитного потока рассеяния над выводными шинами. Выбор оптимального места установки указанных элементов можно осуществить экспериментально путём измерения циркуляционного тока в шунтирующей перемычке при минимальной его величине.

Однако, для снижения нагрева конструктивных элементов не только от циркуляционных, но и от вихревых токов, целесообразна установка электромагнитного экрана с полным охватом выводных шин для снижения магнитных потоков рассеяния. Материал и толщина экрана выбираются в зависимости от величины магнитной индукции в зоне установки экрана и требуемого коэффициента экранирования.

Таким образом, в результате проведенных экспериментальных исследований магнитного поля в зоне выводных шин обмотки статора были получены значения составляющих магнитной индукции, установлены особенности протекания электромагнитных процессов в указанной зоне, выявлена причина возникновения циркуляционных токов и предложены конструктивные меры, направленные на снижение вихревых и циркуляционных токов.

© Грубой А.П., Шофул А.К., Битюцкий Н.Л., Лицов В.И., Логвинов В.П., Кошелев В.В., 2012

