



ГАЙДЕНКО Ю.А.

УДК 621.314: 621.391

ГАЙДЕНКО Ю.А., канд. техн. наук,  
ВИШНЕВСКИЙ Т.С., инж.,  
НТУ Украины "Киевский политехнический ин-т",  
ШТОГРИН А.В., инж., Хмельницкая АЭС.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ В ЭЛЕМЕНТАХ ТОРЦЕВОЙ ЗОНЫ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ НА ОСНОВЕ 3D-МОДЕЛЕЙ

*Разработана полевая математическая модель торцевой зоны мощного турбогенератора типа ТВВ-1000-2УЗ в трехмерной постановке. Выполнено моделирование номинального режима работы турбогенератора. Проведен анализ распределения электромагнитного поля, вихревых токов, а также Джоулевых потерь в таких элементах торцевой зоны турбогенератора как нажимная плита, нажимные пальцы и электропроводящий экран. Аналогичные модели можно использовать и для исследования мощных гидрогенераторов.*



ВИШНЕВСКИЙ Т.С.

**В**ведение. Одним из важнейших аспектов проблемы обеспечения надежного функционирования турбо- и гидрогенераторов электростанций является недопущение перегрева их конструктивных элементов, в частности элементов торцевой (концевой) зоны. К таким элементам обычно относят: нажимные плиты, нажимные пальцы, электропроводящие экраны, крайние пакеты магнитопровода, крепёжные детали, элементы системы водяно-

го охлаждения и т.п.

Известно, что перегрев указанных конструктивных элементов обусловлен наличием переменного поля рассеяния, которое генерируется токами, протекающими в лобовых частях обмотки якоря (статора) и индуктора (ротора). Также известно, что энергия этого поля в основном зависит от величины линейной нагрузки (угла нагрузки) и режима работы. В частности, в режиме недо возбуждения магнитные потоки рассеяния увеличиваются, что приводит к возрастанию вихревых токов, Джоулевых потерь и нагрева различных конструктивных элементов торцевой зоны, испытывающих на себе влияние этих потоков.

До настоящего времени весь комплекс задач по электромагнитным и тепловым процессам в торцевых частях изучен недостаточно полно. Это связано с тем, что электромагнитное поле в торцевой зоне турбо- и гидрогенераторов имеет весьма сложный, трехмерный характер, определяемый следующими основными факторами:

- геометрией лобовых частей обмоток статора и ротора (числом полюсов, размером вылета лобовых частей, углом отгиба лобовых соединений

статора, расположением соединительных шин обмотки статора и токоподводов ротора и т.д.);

- величиной и фазой токовых нагрузок статора и ротора при различных режимах работы генератора;

- общей конфигурацией пространства торцевой части сердечника статора и ротора, геометрии корпуса статора, торцевого (подшипникового) щита, корпуса подшипника, внутренних газоразделительных щитов и т.д.;

- свойствами материалов основных конструктивных элементов, ограничивающих торцевую часть;

- наличием различных экранирующих устройств, специальных магнитных шунтов для канализации потоков рассеяния, а также различных ферромагнитных деталей, выполняющих роль концентраторов магнитного потока в той или иной области.

Каждый из этих факторов может изменять магнитное поле либо во всей зоне, либо в некоторой ее части. Указанные обстоятельства значительно усложняют анализ электромагнитных и тепловых процессов в элементах торцевой зоны турбо- и гидрогенераторов как на этапе их разработки, так и при эксплуатации.

Вследствие вышесказанного очевидно, что для достоверного анализа электромагнитного поля в торцевой зоне турбо- и гидрогенераторов, необходимо применять способы математического моделирования электромагнитного поля, причем, исключительно в *трехмерной постановке* (3D-модель). В последние годы для расчёта пространственных электромагнитных полей широко используется метод конечных элементов (МКЭ) [1, 2], являющийся одним из наиболее развитых и эффективных методов численного решения дифференциальных уравнений.



Результатом математического моделирования с помощью МКЭ является получение пространственно-временного распределения электромагнитного и теплового поля, плотности вихревых токов, потерь (внутренних источников тепла) и других физических величин, позволяющих достоверно оценить тепловое, термомеханическое и вибрационное состояние элементов конструкции турбо- и гидрогенераторов. А это, в свою очередь, даст возможность определить ресурс их работы и наметить меры по уменьшению перегрева, чрезмерной вибрации и других негативных явлений.

**Объектом исследования** выбран двухполюсный турбогенератор мощностью 1000 МВт типа ТВВ-1000-2УЗ, который эксплуатируется на АЭС Украины, в частности на Хмельницкой и Южно-Украинской АЭС. Более чем 25-летний опыт эксплуатации показывает, что на данном типе турбогенератора намного чаще чем на других типах случаются поломки связанные, в том числе, с проблемой перегрева элементов торцевых зон.

Из множества различных конструкционных элементов, принадлежащих торцевым зонам, для исследования выбраны лишь основные: нажимная плита, нажимные пальцы и медный экран.

**Математическая модель.** Процесс создания 3D-модели данного объекта исследования подробно описан в работах [5, 6]. Расчеты проводились с использованием программного комплекса COMSOL Multiphysics.

**Результаты моделирования.** В модели окружающее воздушное пространство моделируется с помощью цилиндра, в котором боковая поверхность имитирует бесконечную воздушную среду. Таким образом, существует возможность проанализировать направление и величину магнитного поля, создаваемого лобовыми частями обмотки статора в районе корпуса турбогенератора. Данная информация очень важна, поскольку в корпусе также выделяются значительные потери мощности. На Рис. 2 показано распределение магнитной индукции в воздушной среде торцевой части турбогенератора в области между лобовыми частями обмотки статора и корпусом. Максимальная величина магнитной индукции в районе внутренней области корпуса составляет 0,009 Тл, причем наибольшие значения индукции сосредоточены в области поворота лобовой части, которая расположена ближе всего к корпусу.

Созданная 3D-модель позволяет проанализировать распределение магнитного поля в отдельных элементах торцевой зоны. Так на Рис. 3-5 представлены распределения магнитной индукции в: нажимной плите, экране и нажимных пальцах при работе турбогенератора в номинальном режиме.

Общей характеристикой распределения магнитной индукции в представленных элементах торцевой части является то, что максимальные значения индукции сосредоточены в областях элементов, расположенных ближе к лобовой части обмотки статора. При этом максимальные величины индукции составляют:

- в нажимной плите – 0,22 Тл;
- в экране – 0,213 Тл;
- в нажимных пальцах – 0,6 Тл.

Таким образом, видно, что в элементах, находящихся ближе к крайнему пакету магнитопровода индукции возрастают, что объясняется ответвлением магнитного поля лобовых частей обмотки статора в крайний пакет.

На Рис. 6, 7 представлено распределение модуля вектора плотности тока в нажимной плите и экране объекта исследования. Эти данные получены уже в квазистатическом режиме, когда магнитное поле пульсирует с номинальной частотой.

Как и ожидалось, максимальные значения (светлый тон) плотности тока сосредоточены в зоне с максимальной индукцией, которая, в свою очередь, расположена ближе к проводникам лобовых частей обмотки статора. Каждый из элементов торцевой зоны оказывает свое экранирующее действие на магнитное поле в зависимости от его пространственного расположения, физических свойств (магнитная проницаемость, электропроводность) и объема.

Максимальное значение плотности тока естественно сосредоточено в медном экране, который имеет наивысшую электропроводность. Но с другой стороны, именно потому, что электрическое сопротивление экрана мало, величина потерь мощности в нем наименьшая из всех элементов.

В то же время, минимальные значения плотностей тока сосредоточены в плите из-за высокого удельного сопротивления. При этом, за счет большого объема суммарные потери в плите наибольшие в сравнении с другими элементами.

На Рис. 7 в области ярма четко видны пять темных областей, свидетельствующих о низкой плотности токов в них. Это является результатом экранирующего действия опор нажимной плиты. Причем это действие проявляется не только в экране, расположенном в непосредственной близости от плиты, но и распространяется вглубь крайнего пакета сердечника статора.

Как уже было сказано, в рассматриваемых элементах торцевой зоны вследствие протекания вихревых токов выделялись потери, которые также были определены в рамках моделирования.

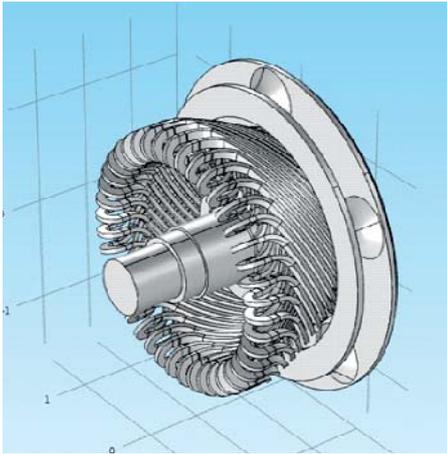


Рис. 1. Пространственная конструкция торцевой зоны TBB-1000-2У3 в программном пакете COMSOL Multiphysics [6].

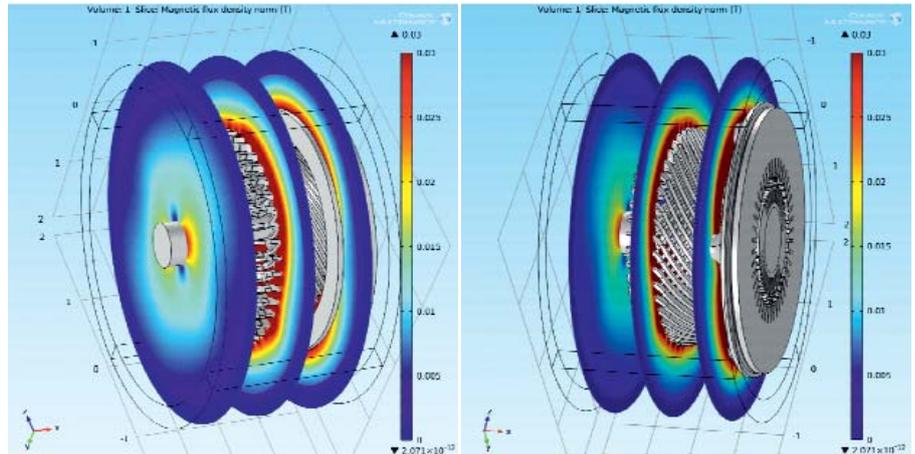


Рис. 2. Распределение магнитной индукции в воздушной среде под корпусом турбогенератора

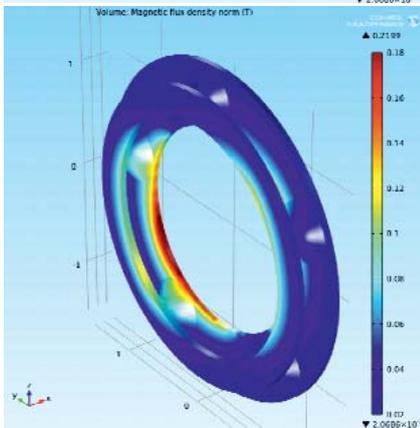
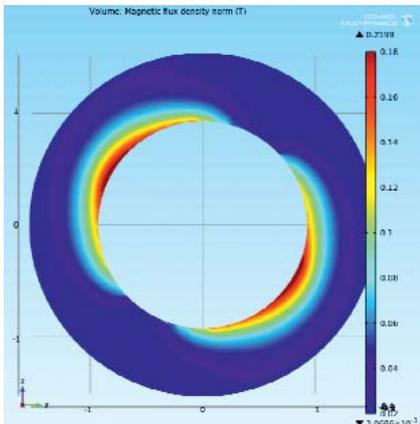


Рис. 3. Распределение магнитной индукции в нажимной плите: а – изометрия; б – вид со стороны крайнего пакета

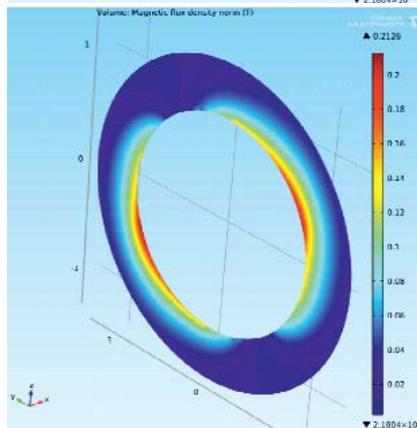
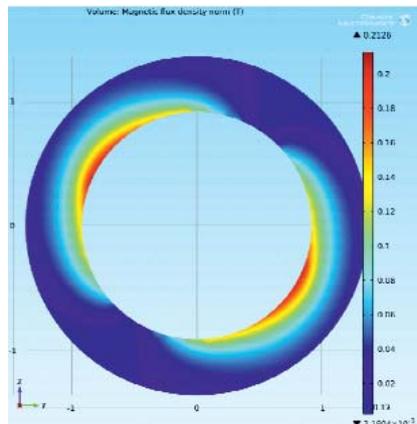


Рис. 4. Распределение магнитной индукции в экране: а) изометрия; б) вид со стороны крайнего пакета

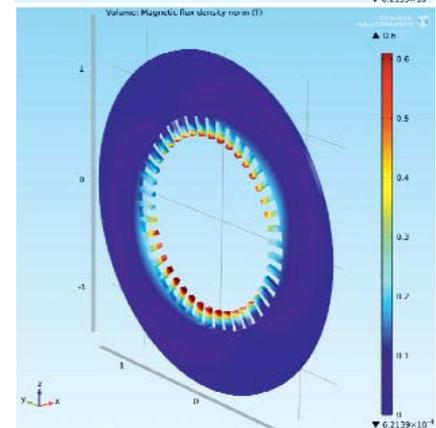
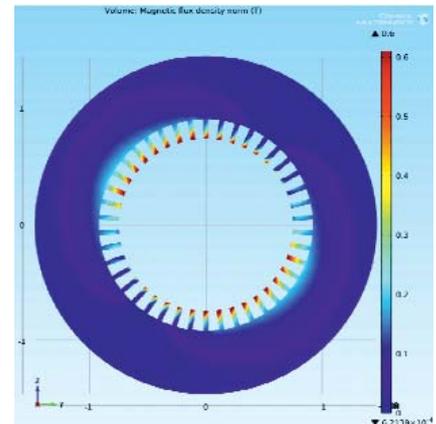


Рис. 5. Распределение магнитной индукции в нажимных пальцах: а) изометрия; б) вид со стороны крайнего пакета

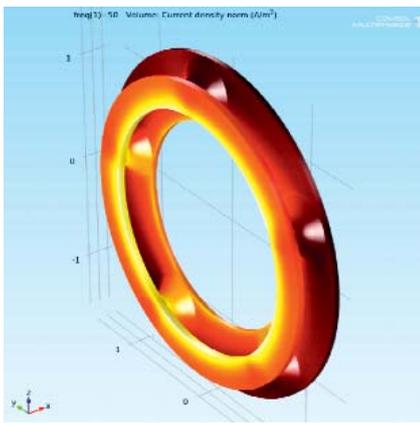


Рис. 6. Распределение модуля вектора плотности тока в нажимной плите

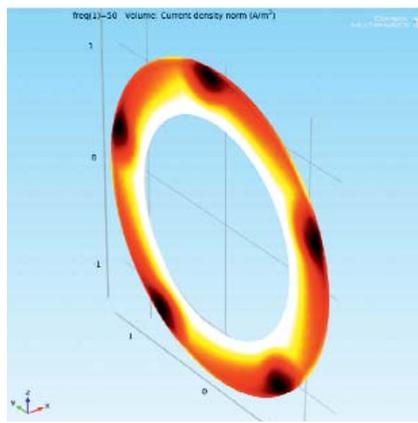


Рис. 7. Распределение модуля вектора плотности тока в экране

Общая величина Джоулевых потерь мощности, припадающих на одну торцевую зону, составляет:  $P = 359,05$  кВт и определяется, как сумма потерь в экране ( $P_{\text{эк}}$ ), нажимной плите ( $P_{\text{пл}}$ ) и пальцах ( $P_{\text{пал}}$ ):

$$P_{(т.ч.1)} = P_{\text{эк}} + P_{\text{пл}} + P_{\text{пал}} = 359,05 \text{ кВт.} \quad (3)$$

Тогда, общая величина Джоулевых потерь мощности в эле-

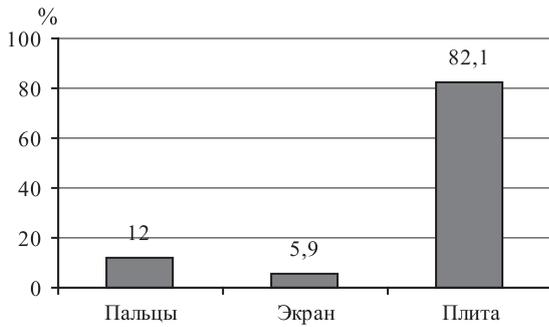


Рис. 8. Диаграмма распределения Джоулевых потерь в элементах торцевой зоны

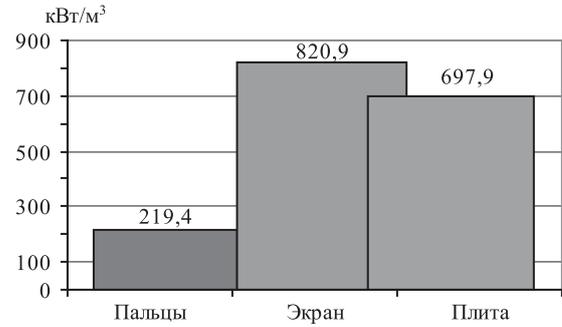


Рис. 9. Распределение средних удельных потерь конструктивных элементов торцевой зоны

ментах торцевой зоны турбогенератора составляет:

$$P_{(т.ч.)} = 2P_{(т.ч.1)} = 718,1 \text{ кВт.} \quad (4)$$

В процентном соотношении Джоулевые потери распределяются, как представлено на Рис. 8.

Как видно, наибольшее количество потерь выделяется в нажимной плите, а наименьшее в экране. Однако объем указанных элементов существенно отличается. Так, объем нажимной плиты составляет 0,4224 м³, нажимных пальцев – 0,1964 м³, экрана – 0,0258 м³. Следовательно, средние удельные потери на единицу объема также будут отличаться (Рис. 9).

Из диаграммы видно, что наиболее нагруженным элементом является экран, в котором удельные потери на 18 % больше, чем в плите и в 3,75 раза больше, чем в нажимных пальцах.

**Выводы.** Создание новых, более сложных тематических моделей, учитывающих реальное трехмерное распределение физических полей и свойств материалов является актуальной задачей. Данные модели позволяют с очень высокой точностью анализировать процессы, проходящие в самых сложных узлах турбо- и гидрогенераторов.

Данные, получаемые на основе 3D-моделирования целесообразнее использовать как на этапе проектирования новых, так и на этапе модернизации существующих типов турбо- и гидрогенераторов. Это связано с тем, что создание 3D-моделей и анализ результатов можно осуществить гораздо быстрее и с меньшими затратами, чем в случае физического моделирования.

Данное исследование, выполненное на примере турбогенератора ТВВ-1000-2УЗ, выявило локальные области некоторых элементов торцевой зоны в которых происходит существенное

выделение Джоулевых потерь и, как следствие, нагрева. При этом удалось проанализировать причины возникновения подобных местных перегревов, а именно – сложные пути замыкания потоков рассеяния в торцевой зоне. Поэтому при разработке новых конструкций турбогенераторов большой мощности конструктор может использовать данную информацию для выбора наиболее эффективных средств защиты деталей и узлов торцевой части от действия потоков рассеяния. Эти средства должны существенно уменьшить местные нагревы деталей и суммарные потери торцевых частей. В результате можно достигнуть повышения надежности эксплуатации, улучшения энергетических характеристик и упрощения системы охлаждения сверхмощных турбогенераторов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сильвестер П., Феррари Р. Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров-электриков. – М.: Мир, 1986. – 229 с.
2. Кулон Ж.-Л., Сабонадьер Ж.-К. САПР в электротехнике. – М.: Мир, 1988. – 208 с.
3. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Многомасштабное моделирование в электротехнике. – К.: Изд. Ин-та электродинамики НАН Украины, 2011. – 255 с.
4. Васковський Ю.М. Польовий аналіз електричних машин: Навч. Посібник. – К: НТУУ "КПІ", 2007. – 192 с.
5. Гайденко Ю.А., Вишневикий Т.С., Штогрин А.В. 3D-моделирование для определения осевых сил, действующих на элементы торцевой зоны мощного турбогенератора // Електротехніка і електромеханіка. – 2013. – № 6. – С. 21–26.
6. Гайденко Ю.А., Вишневикий Т.С. 3D-моделирование для определения тангенциальной неравномерности электрических потерь и нагрева в крайних пакетах турбогенератора // Гідроенергетика України. – 2013. – № 3-4. – С. 28–32.

© Гайденко Ю.А., Вишневикий Т.С., Штогрин А.В., 2014

