

ДОБАВОЧНЫЕ ПОТЕРИ В РОТОРЕ ТУРБОГЕНЕРАТОРА ПРИ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОЙ НЕСИММЕТРИЧНОЙ НАГРУЗКЕ

Шульженко Н.Г., д.т.н., проф., Пантелют М.Г., к.ф.-м.н., Руденко Е.К., к.т.н.
 Институт проблем машиностроения НАН Украины
 Украина, 61046, Харьков, ул. Дм. Пожарского, 2/10
 тел. (0572) 94-27-01, 95-95-46, факс (0572) 94-46-35, E-mail: SHULZH@ipmach.kharkov.ua

Зозулин Ю.В., д.т.н.
 ГП завод "Электротяжмаш"
 Украина, 61055, Харьков, пр. Московский, 299
 тел. (0572) 95-66-47

Виконано комп'ютерне моделювання методом скінчених елементів електромагнітних процесів в роторі синхронного турбогенератора 300 МВт у двовимірній постановці при тривалому несиметричному навантаженні. Досліджено вплив матеріалу пазових клинів на додаткові втрати в роторі без урахування контактних явищ. Показано, що використання титанових клинів є кращим у порівнянні з дюралюмінієвими клинними.

Выполнено компьютерное моделирование методом конечных элементов электромагнитных процессов в роторе синхронного турбогенератора 300 МВт в двухмерной постановке при продолжительной несимметричной нагрузке. Исследовано влияние материала пазовых клиньев на добавочные потери в роторе без учета контактных явлений. Показано, что применение титановых клиньев является предпочтительным по сравнению с дюралюминиевыми клинними.

ВВЕДЕНИЕ

Ротор современного синхронного турбогенератора является наиболее нагруженным конструктивным элементом [1, 2]. Оценка теплового, вибрационного и термочувствительного состояния роторов синхронных турбогенераторов при различных режимах эксплуатации является актуальной задачей современного электромашиностроения. Представляет значительный теоретический и практический интерес исследование режимов, при которых ток нагрузки статора представляет собой несимметричную трехфазную систему с синусоидальным законом изменения тока во времени [3]. Данные режимы обуславливаются значительной несимметрией электрической нагрузки в трехфазных сетях, т.е. существенно различающимися величинами силы тока в фазах обмотки статора. Необходимо отметить, что современные синхронные генераторы должны быть рассчитаны на длительную (в течение многих месяцев или даже лет) эксплуатацию в рассматриваемых режимах.

При длительной несимметричной нагрузке в воздушном зазоре между статором и ротором возникает бегущая волна электромагнитного поля обратной последовательности. Это электромагнитное поле вращается относительно ротора турбогенератора в направлении, противоположном направлению вращения ротора, и наводит в нем значительные вихревые токи частоты 100 Гц [3, 4], которые в основном сосредотачиваются в поверхностном слое толщиной несколько миллиметров (явление скин-эффекта). Вихревые токи вызывают значительные потери, существенно неравномерное распределение температуры по сечению ротора, а также интенсивный локальный нагрев ряда важных конструктивных элементов ротора, в первую очередь клиньев, удерживающих обмотку возбуждения в пазах ротора. Это может привести к возникновению ряда негативных механических явлений в ро-

торе [1, 4, 5], снижающих ресурс турбогенератора.

Данная статья посвящена компьютерному моделированию электромагнитных явлений в роторах турбогенераторов с дюралюминиевыми или титановыми пазовыми клинними при продолжительных несимметричных режимах. Полученные результаты могут быть использованы для оценки теплового, вибрационного и термочувствительного состояния роторов синхронных генераторов.

МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Математическая модель электромагнитных процессов представляет собой систему уравнений Максвелла в дифференциальной форме без учета токов смещения [6]

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \mathbf{H} &= \mathbf{J}; \\ \operatorname{rot} \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}; \\ \operatorname{div} \mathbf{B} &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

дополненную материальными уравнениями, определяющими электрофизические свойства материалов [6]

$$\mathbf{B} = \mu \cdot \mathbf{H}; \mathbf{J} = \gamma \cdot \mathbf{E}, \quad (2)$$

где \mathbf{H} – вектор напряженности магнитного поля; \mathbf{B} – вектор индукции магнитного поля; \mathbf{E} – вектор напряженности электрического поля; \mathbf{J} – вектор плотности токов проводимости; μ – магнитная проницаемость; γ – удельная электрическая проводимость.

В настоящей работе использована методика компьютерного моделирования электромагнитных процессов в роторе турбогенератора в двухмерной постановке в декартовой системе координат, разработанная авторами на основе ряда предположений [5, 7]. Расчет электромагнитного поля выполняется в терминах векторного магнитного потенциала A , который определяется выражением [6]

$$\mathbf{B} = \operatorname{rot} A \quad (3)$$

и в решаемой задаче имеет одну осевую компоненту $A = A_z$, пространственно-временное распределение которой при различных режимах эксплуатации турбогенератора (двухфазное короткое замыкание, несимметричная нагрузка и др.) описывается уравнением в частных производных [5, 7]:

$$\gamma \cdot \frac{\partial A}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left(\frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \cdot \left(\frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial A}{\partial y} \right) + J_0, \quad (4)$$

где A – осевая компонента векторного магнитного потенциала, Вб·м⁻¹; γ – удельная электрическая проводимость, См·м⁻¹; μ – магнитная проницаемость, Гн·м⁻¹; J_0 – плотность тока стороннего источника, А·м⁻².

Расчетная схема ротора турбогенератора приведена на рис. 1. Уравнение (4) решается в системе координат, вращающейся синхронно с ротором [8], применительно к ¼ части конструкции. Соответствующие граничные условия приведены в [5, 7].

Решение уравнения (4) позволяет определить распределение плотности вихревых токов J и добавочных потерь от токов обратной последовательности Q (внутренних источников тепла) для последующего решения задачи теплопроводности [5, 7]:

$$J = -\gamma \cdot \frac{\partial A}{\partial t}; \quad Q = \frac{1}{\gamma} \cdot J^2. \quad (5)$$

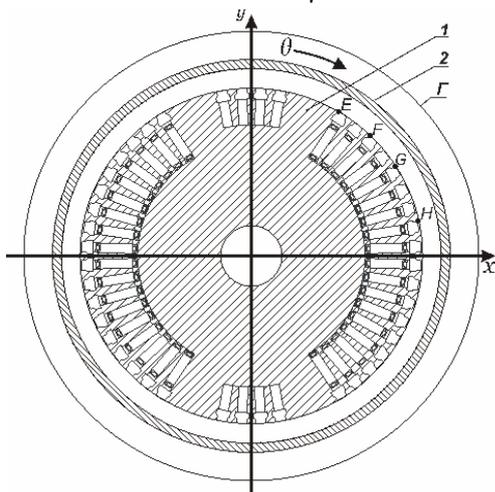


Рис. 1. Расчетная схема сечения ротора турбогенератора
1 – ротор, 2 – подобласть с заданной плотностью тока статора, Г - удаленная граница

В подобласти 2 (рис. 1) задается сила тока обратной последовательности i_2 при длительном несимметричном режиме эксплуатации, который характеризуется протеканием синусоидального незатухающего тока обратной последовательности. В отличие от случая двухфазного короткого замыкания, исследованного авторами в [7], временной закон изменения тока обратной последовательности в рассматриваемом режиме не содержит экспоненциально затухающих компонент, описывающих переходной процесс.

ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Выполнено исследование ротора синхронного генератора 300 МВт при продолжительной несимметричной нагрузке. Конструкция данного ротора и свойства материалов приведены в [7]. Ранее [7] авто-

рами были исследованы электромагнитные процессы в рассматриваемом роторе при двухфазном коротком замыкании.

В подобласти 2 (рис. 1) задается бегущая волна плотности тока обратной последовательности при продолжительном несимметричном режиме эксплуатации турбогенератора вида

$$J_0(t) = 0,08 \cdot J_n \cdot \sin \theta, \quad (6)$$

где J_n – плотность тока статора в номинальном режиме эксплуатации (3,99 А/мм² для турбогенератора 300 МВт); 0,08 – коэффициент предельно-допустимой несимметрии токов фаз статора (8% в соответствии с Межгосударственным стандартом ДСУ 533-2000); $\theta = \omega \cdot t + \alpha$; $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$; $f = 100$ Гц – двойная частота токов обратной последовательности; α – угол, отсчитываемый вдоль расточки в масштабе основной гармонической [3, 7].

Задача решена методом конечных элементов [9, 10] с использованием программного обеспечения, разработанного авторами [10, 11].

Полученные численные результаты для плотности тока и добавочных потерь (5) в роторе с титановыми и дюралюминиевыми пазовыми клиньями приведены на рис. 2-11. Рассматриваемые характерные точки наружной поверхности ротора обозначены на рис. 1 буквами E, F, G, H [7]. На оси абсцисс (рис. 2-11) приведены номера шагов по времени при решении нестационарного уравнения электромагнитного поля (4). При этом величина каждого временного шага составляет $5 \cdot 10^{-4}$ с.

В отличие от случая двухфазного короткого замыкания [7], в длительном несимметричном режиме эксплуатации плотность тока и добавочные потери на наружной поверхности ротора представляют собой гармонические функции с неизменной во времени амплитудой в соответствии с законом изменения плотности тока (6), описывающим длительное протекание тока обратной последовательности. Величина плотности тока в длительном несимметричном режиме значительно (ориентировочно на 2 порядка) меньше, чем при двухфазном коротком замыкании, что объясняется относительно низкой плотностью тока обратной последовательности (6). В связи с этим, добавочные потери в длительном несимметричном режиме примерно на 4 порядка меньше, чем в случае двухфазного короткого замыкания.

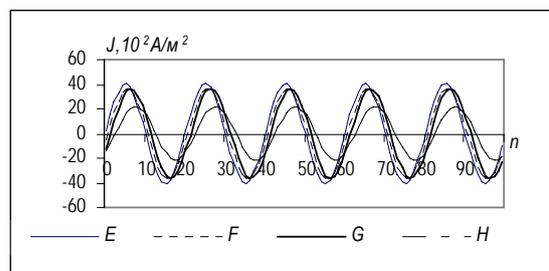


Рис. 2. Плотность тока на наружной поверхности ротора (титановые клинья)

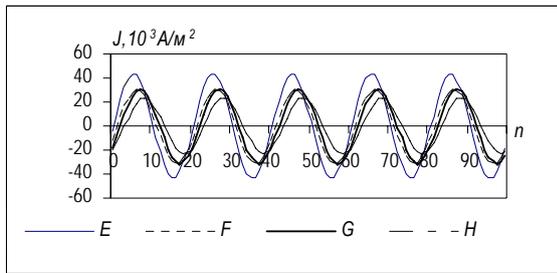


Рис. 3. Плотность тока на наружной поверхности ротора (дюралюминиевые клинья)

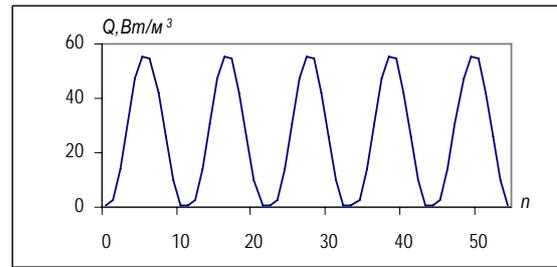


Рис. 8. Добавочные потери на наружной поверхности ротора (дюралюминиевые клинья, точка E)

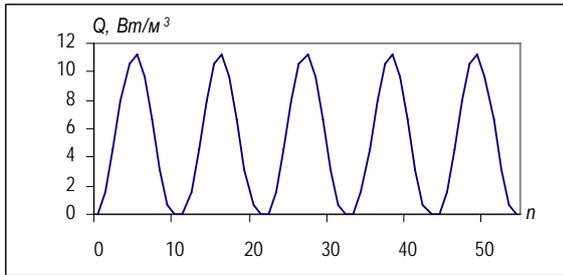


Рис. 4. Добавочные потери на наружной поверхности ротора (титановые клинья, точка E)

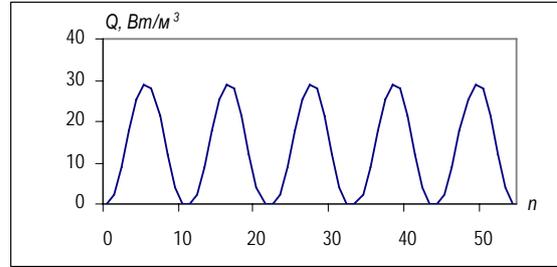


Рис. 9. Добавочные потери на наружной поверхности ротора (дюралюминиевые клинья, точка F)

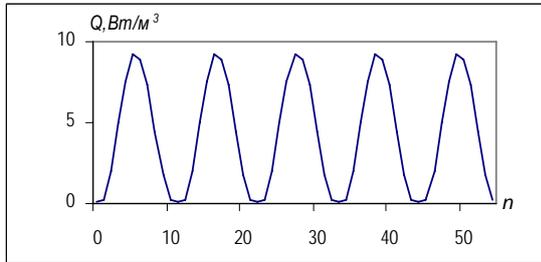


Рис. 5. Добавочные потери на наружной поверхности ротора (титановые клинья, точка F)

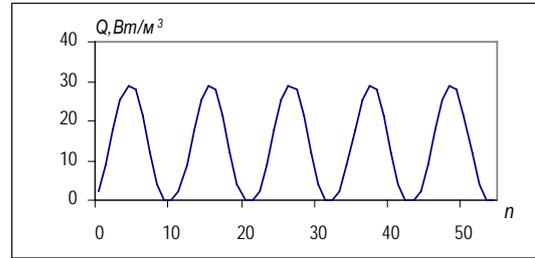


Рис. 10. Добавочные потери на наружной поверхности ротора (дюралюминиевые клинья, точка G)

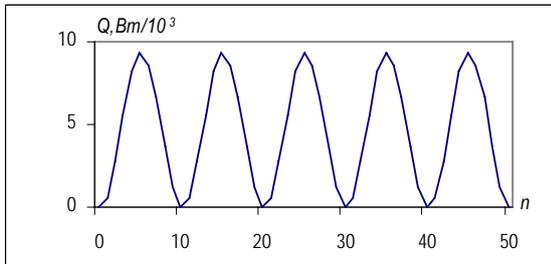


Рис. 6. Добавочные потери на наружной поверхности ротора (титановые клинья, точка G)

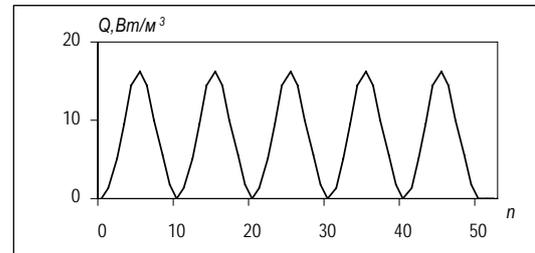


Рис. 11. Добавочные потери на наружной поверхности ротора (дюралюминиевые клинья, точка H)

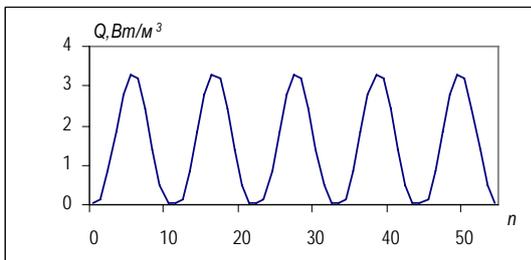


Рис. 7. Добавочные потери на наружной поверхности ротора (титановые клинья, точка H)

Анализ результатов также показывает, что плотность тока на поверхности титановых клиньев (рис. 2) в 7,95-10,57 раза меньше соответствующих величин в случае дюралюминиевых клиньев (рис. 3). Как и в случае двухфазного короткого замыкания турбогенератора [7], это вызвано высокой удельной электрической проводимостью дюралюминия (примерно в 23,3 раза больше, чем у титана).

На рис. 4-11 представлены данные, позволяющие сделать вывод о влиянии материала клиньев на добавочные потери (внутренние источники тепла) в точках E, F, G, H на наружной поверхности ротора. Потери на поверхности титановых клиньев (рис. 4-7) в 3,12-4,96 раза меньше, чем на поверхности клиньев из дюралюминия (рис. 8-11), что объясняется приведенными выше соотношениями удельной электрической

проводимости и плотности тока в обоих рассматриваемых случаях.

На основании приведенных результатов можно сделать заключение, что при принятых в настоящей работе предположениях (в частности, без учета концевых эффектов и контактных явлений в переходе "клин-зуб") величины плотности тока и добавочных потерь в случае продолжительной несимметричной нагрузки турбогенератора значительно (на 2 и 4 порядка соответственно) меньше, чем при двухфазном коротком замыкании рассматриваемого генератора. Тем не менее, длительная (в течение многих месяцев) эксплуатация турбогенератора в данном режиме может привести к существенному изменению его термомеханического состояния и снижению ресурса. Для решения вопроса о влиянии добавочных потерь при длительном несимметричном режиме эксплуатации на выработку ресурса турбогенератора необходимо выполнить моделирование тепловых, вибрационных и упругопластических процессов в роторе.

Из полученных результатов также следует, что с точки зрения величин плотности тока и добавочных потерь в случае продолжительной несимметричной нагрузки турбогенератора применение титановых клиньев является предпочтительным по сравнению с дюралюминиевыми клиньями. Аналогичный вывод был сделан авторами [7] применительно к случаю двухфазного короткого замыкания турбогенератора. Во всех рассматриваемых случаях для решения вопроса о влиянии материала клиньев на тепловое, вибрационное и термомеханическое состояние роторов синхронных генераторов необходимо выполнить также исследование тепловых, вибрационных и упругопластических процессов в роторах [5, 7]. Следует выполнить также моделирование концевой зоны ротора с учетом переходного сопротивления контакта "клин-зуб".

ВЫВОДЫ

В работе выполнено численное моделирование двухмерного распределения электромагнитного поля, плотности тока и добавочных потерь от токов обратной последовательности при длительных несимметричных режимах эксплуатации синхронного турбогенератора 300 МВт. Показано, что величины плотности тока и добавочных потерь в рассматриваемых режимах значительно (на 2 и 4 порядка соответственно) меньше, чем при двухфазном коротком замыкании рассматриваемого генератора [7].

Исследованы два варианта конструкции ротора: с титановыми и дюралюминиевыми пазовыми клиньями без учета контактных явлений на торце в стыке "клин-зуб". Показано, что применение титановых клиньев приводит к существенному снижению величин плотности тока и добавочных потерь в роторе турбогенератора.

Как и в случае двухфазного короткого замыкания [7], для решения вопросов о влиянии добавочных потерь на выработку ресурса турбогенератора и о влиянии материала клиньев на тепловое, вибрационное и термомеханическое состояние роторов при продолжительной несимметричной нагрузке необходимо

выполнить компьютерное моделирование связанных тепловых, вибрационных и упругопластических процессов с учетом явлений в концевой зоне ротора, в первую очередь контактных явлений.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Турбогенераторы. Расчет и конструкция / Титов В.В., Хуторецкий Г.М., Загородная Г.А. и др. – Л.: Энергия, 1967. – 895 с.
- [2] Хуторецкий Г.М., Токов М.И., Толвинская Е.В. Проектирование турбогенераторов. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 256 с.
- [3] Данилевич Я.Б., Кашарский Э.Г. Добавочные потери в электрических машинах. – М.: ГЭИ, 1963. – 214 с.
- [4] Bhargava S.C. Negative-sequence currents, losses and temperature rise in the rotor of a turbogenerator during transient unbalanced operation. – Electric Machines and Power Systems. – 1983, v. 8. – P. 155–168.
- [5] Пантелят М.Г., Шульженко Н.Г. Математическое моделирование двумерных электромагнитных и тепловых полей в роторе турбогенератора. – Электротехника и электромеханика. – 2004, № 3. – С. 84–86.
- [6] Демирчян К.С. Моделирование магнитных полей. – Л.: Энергия, 1974. – 288 с.
- [7] Шульженко Н.Г., Зозулин Ю.В., Пантелят М.Г., Руденко Е.К., Петушкова С.А. Влияние материала пазовых клиньев на распределение электромагнитного поля, плотности тока и потерь от токов обратной последовательности в роторе турбогенератора при двухфазном коротком замыкании. – Электротехника и электромеханика. – 2005, № 3. – С. 61–64.
- [8] www.vectorfields.com
- [9] Сильвестер П., Феррари Р. Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров-электриков. – М.: Мир, 1986. – 229 с.
- [10] Gontarowsky P.P., Pantelyat M.G. Application of the finite element method to coupled eddy current, thermal and mechanical problems. – Proceedings of the 6th International IGTE Symposium on Numerical Field Calculation in Electrical Engineering, Graz, Austria, September 1994. – P. 300–308.
- [11] Pantelyat M.G. Coupled electromagnetic, thermal and elastic-plastic simulation of multi-impulse inductive heating. – International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics. – 1998, v. 9. – P. 11–24.

Поступила 07.09.2005