

## ВЛИЯНИЕ МАТЕРИАЛА ПАЗОВЫХ КЛИНЬЕВ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ, ПЛОТНОСТИ ТОКА И ПОТЕРЬ ОТ ТОКОВ ОБРАТНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ В РОТОРЕ ТУРБОГЕНЕРАТОРА ПРИ ДВУХФАЗНОМ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ

Шульженко Н.Г., д.т.н., проф., Пантелют М.Г., к.ф.-м.н., с.н.с., Руденко Е.К., к.т.н., Петушкова С.А.  
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 двовимірний скінченноелементний аналіз нестационарного розподілу електромагнітного поля, щільності току та втрат від токів зворотної послідовності при короткому замкненні двох фаз синхронного генератора 300 МВт. Досліджено два варіанти конструкції ротора: з пазовими клиньями з дюралюмінію та титану без урахування контактних явищ. Показано, що використання титанових клинів приводить до суттєвого зниження щільності току та додаткових втрат у роторі турбогенератора.*

*Выполнен двухмерный конечноэлементный анализ нестационарного распределения электромагнитного поля, плотности тока и потерь от токов обратной последовательности при коротком замыкании двух фаз синхронного турбогенератора 300 МВт. Исследованы два варианта конструкции ротора: с пазовыми клиньями из дюралюминия и титана без учета контактных явлений. Показано, что применение титановых клиньев приводит к существенному снижению плотности тока и добавочных потерь в роторе турбогенератора.*

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Исследование теплового, вибрационного и термомеханического состояния роторов синхронных генераторов при коротком замыкании двух фаз является актуальной задачей современного электромашиностроения [1, 2]. Для решения указанной задачи необходимо выполнить комплексные исследования электромагнитных, тепловых и механических процессов в роторах различных конструкций [3, 4]. Значительный теоретический и практический интерес представляет исследование влияния материала пазовых клиньев на электромагнитное, тепловое и механическое состояние роторов. Данная статья посвящена компьютерному моделированию электромагнитных явлений в роторе турбогенератора в случаях использования дюралюминия или титана для пазовых клиньев. Полученные результаты могут быть использованы для оценки теплового, вибрационного и термомеханического состояния роторов синхронных генераторов.

### ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ И МЕТОДИКА КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В настоящей работе использована методика компьютерного моделирования двухмерных электромагнитных процессов в роторе турбогенератора, разработанная [4] на основе следующих предположений:

- ток во всех участках ротора протекает в осевом направлении, что обосновывается большим отношением длины к диаметру типовых роторов турбогенераторов. Предполагается также, что клинья не имеют разрывов по длине; концевые явления не учитываются. Моделирование электромагнитных и тепловых процессов может быть выполнено при этом в двумер-

ной постановке в декартовой системе координат [3];

- ток в обмотке статора моделируется поверхностным [3], поскольку предполагается, что сердечник статора изготовлен из стали с бесконечной магнитной проницаемостью;

- не учитывается существенно нелинейная зависимость магнитной проницаемости стали ротора от напряженности магнитного поля и используется постоянное среднее значение магнитной проницаемости [3].

Распределение электромагнитного поля описывается нестационарным уравнением [3, 4]:

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

где  $A$  – векторный магнитный потенциал, Вб·м<sup>-1</sup>;  $\gamma$  – удельная электрическая проводимость, См·м<sup>-1</sup>;  $\mu$  – магнитная проницаемость, Гн·м<sup>-1</sup>;  $J_0$  – плотность тока стороннего источника, А·м<sup>-2</sup>.

Расчетная схема ротора турбогенератора приведена на рис. 1.

Уравнение (1) решается при граничных условиях, соответствующих данной схеме [3-5]:

- на оси симметрии ( $x = 0$ ):  $\partial A / \partial x = 0$ ;
- на оси антисимметрии ( $y = 0$ ):  $A = 0$ ;
- на удаленных границах  $\Gamma$  в диэлектрических под областях  $A_\Gamma = 0$ .

Решение уравнения (1) представляет собой пространственно-временное распределение векторного магнитного потенциала  $A(x, y, t)$ , которое позволяет определить распределение плотности вихревых токов  $J$  и потерь  $Q$  (внутренних источников тепла) для последующего решения задачи теплопроводности [3, 4]:

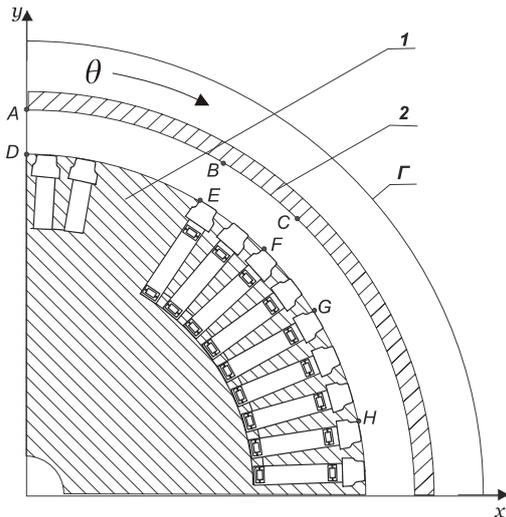


Рис. 1. Расчетная схема сечения ротора турбогенератора (1/4 поперечного сечения): 1 – ротор, 2 – подобласть с заданной плотностью тока статора,  $\Gamma$  - удаленная граница

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

В подобласти 2 (см. рис. 1) задается сила тока обратной последовательности  $i_2$  при коротком замыкании фаз В и С турбогенератора [3].

#### ИССЛЕДУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ РОТОРА

Выполнено исследование ротора синхронного генератора 300 МВт. Расчетная схема сечения ротора приведена на рис. 1.

Диаметр ротора 112 см, материал ротора – сталь с удельной электрической проводимостью  $\gamma = 0,5 \cdot 10^7$  См·м<sup>-1</sup> [6] и постоянным средним значением магнитной проницаемости  $\mu = 100\mu_0$  ( $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума).

Обмоточные пазы (кроме пазов на поверхности большого зуба) заполнены медной обмоткой с удельной электрической проводимостью  $\gamma = 6 \cdot 10^7$  См·м<sup>-1</sup>. Рассматриваются два варианта материала немагнитных пазовых клиньев (кроме пазов на поверхности большого зуба): дюралюминиевые ( $\gamma = 3,33 \cdot 10^7$  См·м<sup>-1</sup> [6]) и титановые ( $\gamma = 1,43 \cdot 10^6$  См·м<sup>-1</sup> [6]) Пазовые клинья на поверхности большого зуба выполнены из той же стали, что и ротор.

Воздушный зазор между статором и ротором – 9 см. Плотность токов обратной последовательности задается в подобласти 2 (рис. 1) толщиной 5 см. Материал подобласти – медь ( $\gamma = 6 \cdot 10^7$  См·м<sup>-1</sup>). В указанной части конструкции задается бегущая волна плотности токов обратной последовательности при коротком замыкании двух фаз турбогенератора вида [3, 7]

$$J_0(t) = (A \cdot e^{-t/T_1} + B \cdot e^{-t/T_2} + C) \cdot \sin \theta, \quad (3)$$

где  $A, B, C$  – константы, описывающие переходной процесс при коротком замыкании фаз В и С данного турбогенератора [3];  $T_1, T_2$  – постоянные времени рассматриваемого переходного процесса, с [3];  $\theta = \omega \cdot t + \alpha$ ;  $\omega = 2\pi \cdot f$ ;  $f = 100$  Гц – двойная частота токов обратной последовательности;  $\alpha$  – угол, отсчитываемый вдоль расточки в масштабе основной гармониче-

ской [7]. Радиус удаленной границы  $\Gamma$  (см. рис. 1), где  $A_\Gamma = 0$ , составляет 150 см.

#### АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Задача решена методом конечных элементов [8]. Результаты приведены на рис. 2-13. Рассматриваемые характерные точки внутренней поверхности подобласти 2 (см. рис. 1) и наружной поверхности ротора обозначены на рис.1 буквами  $A, B, C, D, E, F, G, H$ . На оси абсцисс (см. рис. 2-13) приведены номера шагов по времени при решении нестационарного уравнения электромагнитного поля (1). При этом величина каждого временного шага составляет  $5 \cdot 10^{-4}$  с.

На рис. 2-5 приведено рассчитанное временное распределение векторного магнитного потенциала в характерных точках внутренней поверхности подобласти 2 (рис. 1) и наружной поверхности ротора с титановыми и дюралюминиевыми клиньями.

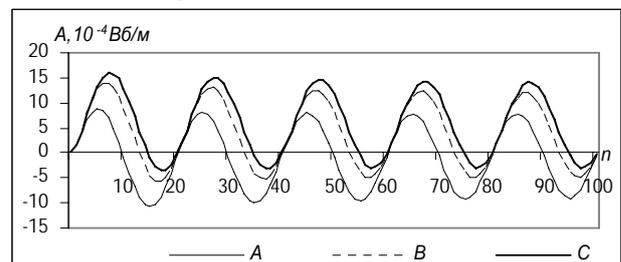


Рис. 2. Векторный магнитный потенциал на внутренней поверхности статора (титановые клинья)

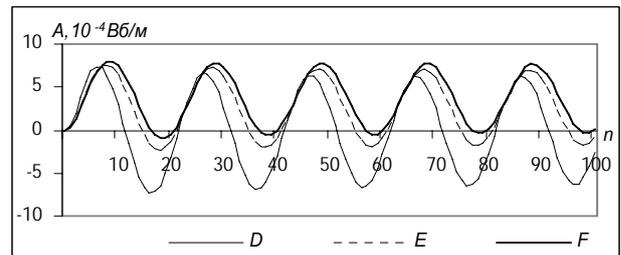


Рис. 3. Векторный магнитный потенциал на наружной поверхности ротора (титановые клинья)

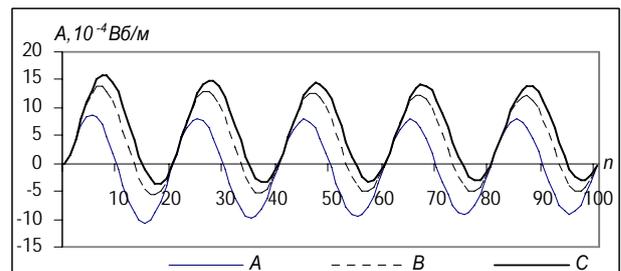


Рис. 4. Векторный магнитный потенциал на внутренней поверхности статора (дюралюминиевые клинья)

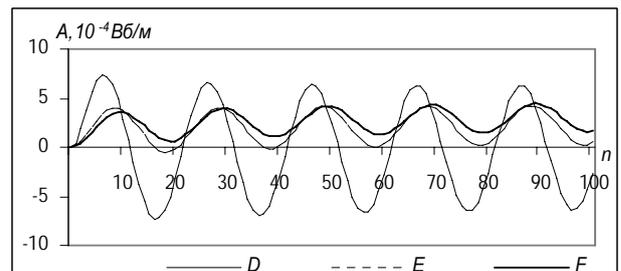


Рис. 5. Векторный магнитный потенциал на наружной поверхности ротора (дюралюминиевые клинья)

Естественно, результаты, полученные для обоих материалов клиньев, практически полностью совпадают в точках  $A$ ,  $B$ ,  $C$  (подобласть 2 с заданной плотностью сторонних токов) и  $D$  (наружная поверхность ротора в окрестности паза со стальным клином на поверхности большого зуба). В то же время, в точках  $E$ ,  $F$  (наружная поверхность титановых или дюралюминиевых клиньев) наблюдается существенное влияние материала клина на величину векторного магнитного потенциала. Амплитудное значение векторного магнитного потенциала в данных точках в случае титановых клиньев (рис. 3) в 1,59-1,71 раза превосходит соответствующее значение при использовании дюралюминиевых клиньев (рис. 5).

Явление скин-эффекта в пазовых клиньях во вращающемся относительно ротора нестационарном электромагнитном поле и его зависимость от материала клиньев могут быть проиллюстрированы сопоставлением рис. 2-5 и рис. 6-9.

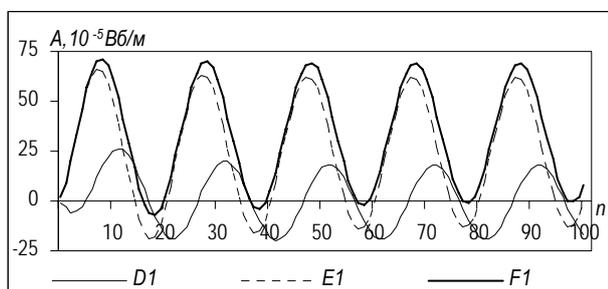


Рис. 6. Векторный магнитный потенциал в характерных точках сечения ротора (титановые клинья)

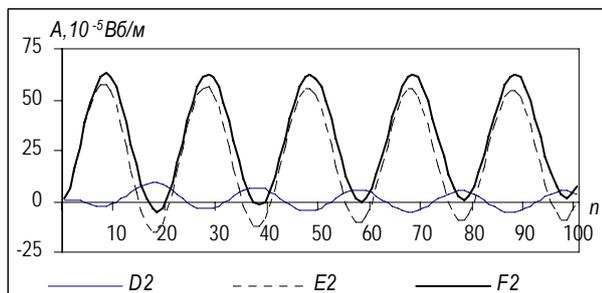


Рис. 7. Векторный магнитный потенциал в характерных точках сечения ротора (титановые клинья)

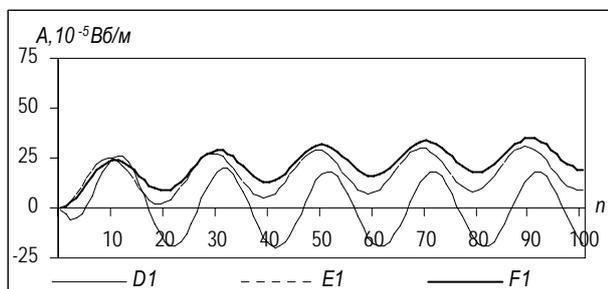


Рис. 8. Векторный магнитный потенциал в характерных точках сечения ротора (дюралюминиевые клинья)

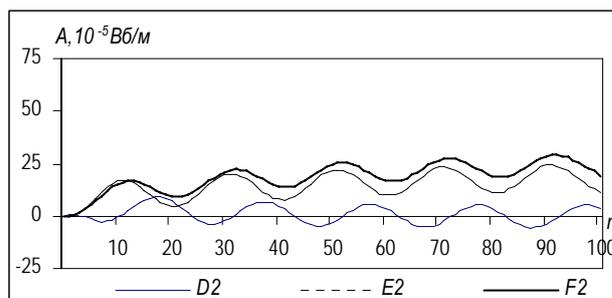


Рис. 9. Векторный магнитный потенциал в характерных точках сечения ротора (дюралюминиевые клинья)

На рис. 6-9 приведено изменение векторного магнитного потенциала во времени в точках, находящихся под поверхностью соответствующих клиньев (т.е. под точками  $D$ ,  $E$ ,  $F$ ) на глубине 0,4 см и 0,8 см (на рис. 6-9 данные точки обозначены соответственно  $D_1$ ,  $E_1$ ,  $F_1$  и  $D_2$ ,  $E_2$ ,  $F_2$ ). Из полученных результатов следует, что в титановом клине амплитуда магнитного поля уменьшается по толщине в 1,10-1,15 раза на глубине 0,4 см и в 1,22-1,28 раза на глубине 0,8 см от поверхности. В случае дюралюминиевого клина уменьшение амплитудного значения векторного магнитного потенциала существеннее: 1,27-1,42 раза на глубине 0,4 см и 1,53-1,81 раза на глубине 0,8 см. Это свидетельствует о более выраженном характере явления скин-эффекта при применении дюралюминиевых пазовых клиньев.

Влияние материала пазовых клиньев на распределение плотности тока ( $J$ ) может быть оценено по данным рис. 10, 11 (точки  $E$ ,  $F$ ,  $G$ ,  $H$  на наружной поверхности ротора).

Как следует из приведенных результатов, плотность тока на поверхности дюралюминиевых клиньев в 8,44-10,49 раза больше соответствующих величин в случае титановых клиньев. Это объясняется высокой удельной электрической проводимостью дюралюминия (примерно в 23,3 раза больше, чем у титана).

На рис. 12, 13 представлены данные, позволяющие сделать вывод о влиянии материала клиньев на потери (внутренние источники тепла) в точках  $E$ ,  $F$ ,  $G$ ,  $H$  на наружной поверхности ротора. Потери на поверхности дюралюминиевых клиньев в 3,22-4,93 раза больше, чем на поверхности клиньев из титана, что объясняется приведенными выше соотношениями удельной электрической проводимости и плотности тока в обоих рассматриваемых случаях.

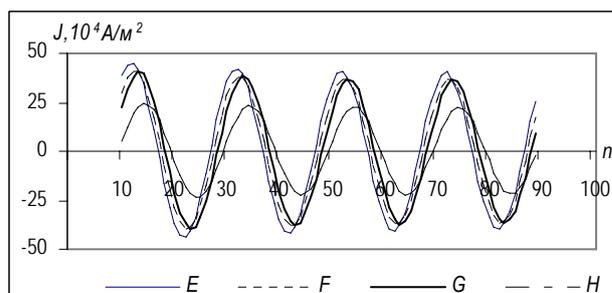


Рис. 10. Плотность тока на наружной поверхности ротора (титановые клинья)

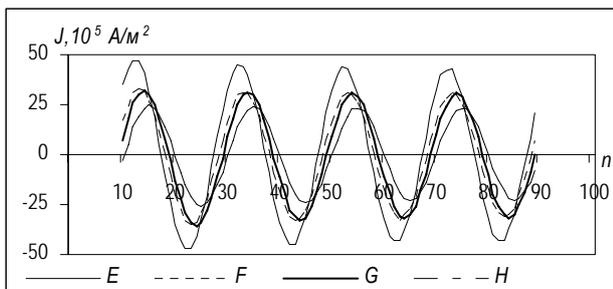


Рис. 11. Плотность тока на наружной поверхности ротора (дюралюминиевые клинья)

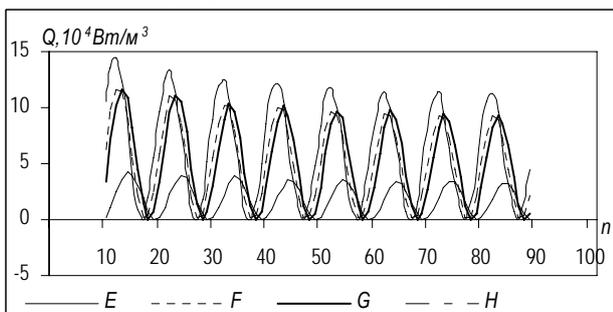


Рис. 12. Добавочные потери на наружной поверхности ротора (титановые клинья)

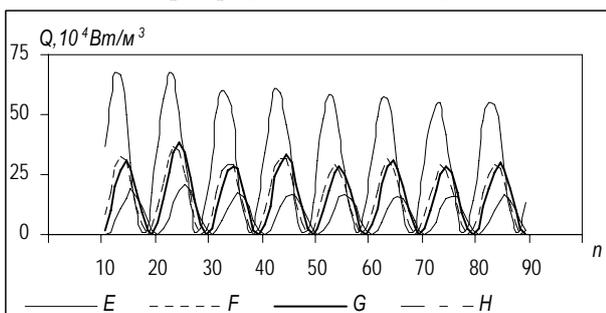


Рис. 13. Добавочные потери на наружной поверхности ротора (дюралюминиевые клинья)

На основании приведенных результатов может быть сделан вывод о том, что без учета концевой эффекта и контактных явлений в переходе «клин-зуб» с точки зрения величин плотности тока и добавочных потерь от токов обратной последовательности применение титановых клиньев является предпочтительным по сравнению с дюралюминиевыми клиньями. Однако, для решения вопроса о влиянии материала клиньев на тепловое, вибрационное и термостойкое состояние роторов синхронных генераторов при коротком замыкании двух фаз должно быть выполнено также моделирование тепловых, вибрационных и упругопластических процессов при рассмотренном электромагнитном состоянии. Тот факт, что потери (внутренние источники тепла) в дюралюминиевых клиньях значительно больше, чем в клиньях из титана, не позволяет сделать непосредственные выводы о влиянии материала клиньев на температурное поле ротора, поскольку теплопроводность титана значительно меньше, чем теплопроводность дюралюминия. Численное решение уравнения теплопроводности [4] с полученным распределением потерь (внутренних источников тепла) и соответствующими граничными условиями, описывающими водя-

ное или водородное охлаждение генератора, позволит сделать вывод о тепловых процессах в роторе при коротком замыкании. Необходимо также выполнить моделирование концевой зоны ротора с учетом переходного сопротивления контакта «клин-зуб».

## ВЫВОДЫ

В настоящей работе выполнено численное моделирование методом конечных элементов двухмерного нестационарного распределения электромагнитного поля, плотности тока и потерь от токов обратной последовательности при коротком замыкании двух фаз синхронного турбогенератора 300 МВт. 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.

Для решения вопроса о влиянии материала клиньев на тепловое, вибрационное и термостойкое состояние роторов синхронных генераторов при коротком замыкании двух фаз необходимо выполнить компьютерное моделирование связанных тепловых, вибрационных и упругопластических процессов с учетом явлений в концевой зоне ротора.

## 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] 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.
- [4] Пантелют М.Г., Шульженко Н.Г. Математическое моделирование двухмерных электромагнитных и тепловых полей в роторе турбогенератора. – *Электротехника и электромеханика*. – 2004, № 3. – С. 84–86.
- [5] Демирчян К.С. Моделирование магнитных полей. – Л.: Энергия, 1974. – 288 с.
- [6] Брынский Е.А., Данилевич Я.Б., Яковлев В.И. Электромагнитные поля в электрических машинах. – Л.: Энергия, 1979. – 176 с.
- [7] Данилевич Я.Б., Кашарский Э.Г. Добавочные потери в электрических машинах. – М.: ГЭИ, 1963. – 214 с.
- [8] Сильвестер П., Феррари Р. Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров-электриков. – М.: Мир, 1986. – 229 с.

Поступила 25.03.2005