

А.Н. САФОНОВ, аспирант, ИПМаш НАН Украины, Харьков
М.Г. ПАНТЕЛЯТ, канд. физ.-мат. наук, с.н.с., ИПМаш НАН Украины, Харьков
Е.К. РУДЕНКО, канд. техн. наук, научный сотрудник, ИПМаш НАН Украины, Харьков
Н.Г. ШУЛЬЖЕНКО, д-р техн. наук, проф., зав. отделом, ИПМаш НАН Украины, Харьков

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ НЕСТАЦИОНАРНОЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ В СТЫКАХ ПАЗОВЫХ КЛИНЬЕВ РОТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА ТГВ-300

Наводиться методика скінченноелементного аналізу нестационарних електромагнітних полів у фрагментах конструкцій синхронних турбогенераторів й електротехнічного обладнання різного призначення в тривимірній постановці. Наводяться результати розрахунків модуля щільності вихрових струмів, додаткових втрат від вихрових струмів та індукції магнітного поля в стиках пазових клинів ротора турбогенератора ТГВ-300.

Описывается методика конечноэлементного анализа нестационарных электромагнитных полей в фрагментах конструкций синхронных турбогенераторов и электротехнического оборудования различного назначения в трехмерной постановке. Приводятся результаты расчетов модуля плотности вихревых токов, добавочных потерь от вихревых токов и индукции магнитного поля в стыках пазовых клиньев ротора турбогенератора ТГВ-300.

Введение. Исследование ряда электромагнитных процессов в электрических машинах осуществляется посредством анализа нестационарного магнитного поля [1-3]. Результаты расчетов позволяют установить особенности электромагнитных процессов в создаваемом оборудовании, а пространственно-временное распределение электромагнитного поля позволяет также определить плотность вихревых токов, потери от вихревых токов (внутренние источники тепла), момент и электромагнитные силы для последующей расчетной оценки теплового, термомеханического и вибрационного состояния конструкции и срабатывания ее ресурса.

Разработка эффективных методик для расчета нестационарных электромагнитных процессов в трехмерной постановке является актуальной задачей, поскольку существующие методики и программное

обеспечение для компьютерного моделирования электромагнитного поля в двухмерной постановке [2-4] не позволяют проводить численный анализ пространственных электромагнитных процессов в конструкциях электрических машин.

В результате использования методики конечноэлементного анализа нестационарных электромагнитных полей в трехмерной постановке получено изменение величин, характеризующих электромагнитные процессы в пазовых клиньях, по длине фрагмента ротора [5] и их изменение во времени в различных точках ротора [6].

В данной работе приводятся полученные данные об изменении во времени модуля плотности вихревых токов, добавочных потерь от вихревых токов, а также компонент и модуля индукции магнитного поля.

Основные расчетные соотношения и метод решения. Нестационарные электромагнитные явления в электрических машинах описываются [3, 7] системой уравнений Максвелла в дифференциальной форме без учета токов смещения, дополненной материальными уравнениями, определяющими электрофизические свойства материалов (магнитную проницаемость μ и удельную электрическую проводимость γ). В общем случае, магнитная проницаемость μ может зависеть от напряженности магнитного поля H [8, 9]. Явления магнитного гистерезиса и анизотропии магнитных свойств материалов не учитываются.

В данной работе система уравнений Максвелла решается с использованием векторного магнитного потенциала A [7]. Уравнения нестационарного электромагнитного поля приобретают вид [10]:

$$\begin{aligned} \gamma \frac{\partial A_x}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_x}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_x}{\partial z} \right) + J_x; \\ \gamma \frac{\partial A_y}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_y}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_y}{\partial z} \right) + J_y; \\ \gamma \frac{\partial A_z}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial z} \right) + J_z, \end{aligned} \quad (1)$$

где A_x, A_y, A_z – компоненты векторного магнитного потенциала; J_x, J_y, J_z – заданные компоненты вектора плотности сторонних токов; μ – магнитная проницаемость; γ – удельная электрическая проводимость.

Уравнения (1) с соответствующими граничными условиями решаются методом конечных элементов [11] с использованием 8-узловых конечных элементов в виде произвольных шестигранников. Программное обеспечение разработано для исследования конструкций сложной

геометрии в декартовой, цилиндрической, тороидальной и сферической системах координат. В настоящее время реализовано решение линейной задачи расчета нестационарного электромагнитного поля, т.е. зависимость магнитной проницаемости μ от напряженности магнитного поля \mathbf{H} не учитывается. При выполнении расчетов для магнитомягких материалов (например, для стали ротора турбогенератора) задается постоянное среднее значение магнитной проницаемости [12].

Вопросы достоверности численных результатов для частных случаев стационарного и нестационарного поля рассмотрены в [13, 14].

Полученное численное решение для векторного магнитного потенциала \mathbf{A} позволяет рассчитать распределения плотности вихревых токов \mathbf{J} , добавочных потерь от вихревых токов Q , индукции \mathbf{B} и напряженности магнитного поля \mathbf{H} в рассматриваемом фрагменте ротора:

$$\mathbf{J} = -\gamma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}; \quad Q = \frac{J^2}{\gamma}; \quad \mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A}; \quad \mathbf{H} = \mu^{-1} \mathbf{B}. \quad (2)$$

Решение задачи представляется в виде изолиний компонент и модуля векторного магнитного потенциала \mathbf{A} , плотности вихревых токов \mathbf{J} , индукции магнитного поля \mathbf{B} , напряженности магнитного поля \mathbf{H} и потерь Q по всей расчетной области либо по отдельным ее фрагментам в заданные моменты времени, а также в виде временного закона изменения указанных величин в интересующих расчетчика характерных точках конструкции.

Нестационарные электромагнитные процессы в стыках пазовых клиньев ротора турбогенератора ТГВ-300. С использованием разработанной методики выполнено численное исследование пространственного нестационарного электромагнитного поля и потерь от вихревых токов в стыках немагнитных пазовых клиньев ротора турбогенератора ТГВ-300 при коротком замыкании двух фаз.

Расчетная модель ротора турбогенератора ТГВ-300 представлена на рис. 1. Рассматриваемый фрагмент ротора (область стыков пазовых клиньев длиной 40 см) приведен на рис. 2. Зазор между клиньями – 1,5 мм. На рис. 3 показано поперечное сечение ($1/4$ часть) расчетной модели машины [12].

Диаметр ротора (подобласть 1 на рис. 3) – 110 см, материал – сталь с удельной электрической проводимостью $\gamma = 0,5 \cdot 10^7 \text{ См} \cdot \text{м}^{-1}$ и постоянным средним значением магнитной проницаемости $\mu = 100\mu_0$ (μ_0 – магнитная проницаемость вакуума).

Обмоточные пазы (кроме пазов на поверхности большого зуба) заполнены медной обмоткой с удельной электрической проводимостью γ

$= 6 \cdot 10^7 \text{ См} \cdot \text{м}^{-1}$. Материал немагнитных пазовых клиньев (кроме пазов на поверхности большого зуба) – дюралюминий ($\gamma = 3,33 \cdot 10^7 \text{ См} \cdot \text{м}^{-1}$). Пазовые клинья на поверхности большого зуба выполнены из той же стали, что и ротор.

Бегущая волна плотности токов обратной последовательности при коротком замыкании двух фаз турбогенератора задается в подобласти 2 толщиной 5 см, которая имитирует статор турбогенератора (рис. 3). Материал подобласти – медь ($\gamma = 6 \cdot 10^7 \text{ См} \cdot \text{м}^{-1}$). Воздушный зазор между статором и ротором (подобласть 3) – 9 см.

Радиус удаленной границы Γ (рис. 3), на которой задаются нулевые граничные условия для всех трех компонент векторного магнитного потенциала, составляет 150 см.

Длина рассматриваемого фрагмента ротора (рис. 2) – 40 см, толщина воздушного зазора между клиньями – 1,5 мм.

На обоих торцах расчетной области (рис. 2) задаются граничные условия симметрии для компонент векторного магнитного потенциала (A_x, A_y, A_z), что оправдывается относительно небольшой длиной рассматриваемого фрагмента ротора в области стыка клиньев. При этом предполагается, что соседние по длине ротора стыки клиньев находятся в практически одинаковом нестационарном поле стороннего источника, которое не изменяется по длине ротора на участке длиной 40 см. На левой и правой вертикальных границах воздушного зазора между клиньями заданы граничные условия $A_z = 0$, что описывает физические условия непротекания переменного электрического тока в направлении оси ротора через воздушный зазор между клиньями.

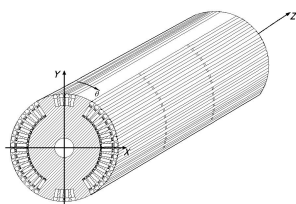


Рис. 1.

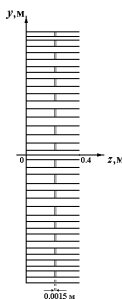


Рис. 2.

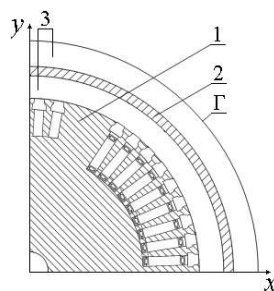


Рис. 3.

В подобласти 2 (рис. 3), представляющей собой упрощенную модель статора [12], задается бегущая волна плотности токов обратной

последовательности при коротком замыкании двух фаз машины. Пространственно-временное распределение задаваемых токов обратной последовательности двойной частоты (100 Гц) приведено в [6, 12, 15].

Полученное в результате решения задачи пространственное распределение электромагнитного поля проиллюстрируем приведенными на рис. 4 линиями равного уровня осевой компоненты A_z векторного магнитного потенциала на левом торце рассматриваемого фрагмента конструкции (сечение $z = 0$ на рис. 2) при $t = 45$ мс (переходной процесс при коротком замыкании двух фаз к данному моменту времени практически стабилизируется [6]). В отличие от стационарной задачи [13], характер изолиний графически отображает явление скин-эффекта (сосредоточение переменного электромагнитного поля и вихревых токов в относительно тонком поверхностном слое), имеющее место на рассматриваемом режиме работы турбогенератора.

Численные результаты во временной области иллюстрируются графиками, характеризующими протекание нестационарных электромагнитных процессов в рассматриваемом фрагменте машины. Зависимости, полученные для компонент векторного магнитного потенциала и плотности вихревых токов, а также подробный анализ переходных процессов и явления скин-эффекта в пазовых клиньях во вращающемся относительно ротора нестационарном электромагнитном поле приведены в [6]. Наибольший интерес представляют законы изменения во времени модуля плотности вихревых токов J , добавочных потерь от вихревых токов Q , а также компонент и модуля индукции магнитного поля B и напряженности магнитного поля H . На рис. 5 – 16 представлены графики для плотности тока, добавочных потерь и индукции магнитного поля в различных точках ротора (по его радиусу и длине). Результаты приведены по лучам, расположенным под углом 45° к осям x и y (рис. 1, 3): на наружной поверхности ротора (радиус 0,550 м, кривые 1); на глубине 0,4 см под поверхностью соответствующего пазового клина (радиус 0,546 м, кривые 2); на глубине 0,8 см под поверхностью клина (радиус 0,542 м, кривые 3).

Графики, приведенные на рис. 5, 7, 9, 11, 13, 15 иллюстрируют временной закон изменения соответствующих величин на левом торце фрагмента (точка с осевой координатой $z = 0$ на рис. 2), а на рис. 6, 8, 10, 12, 14, 16 – на левой вертикальной границе воздушного зазора между клиньями ($z = 0,19925$ м, рис. 2).

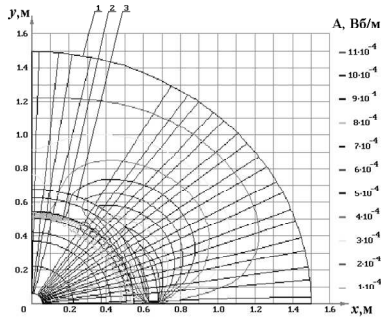


Рис. 4.

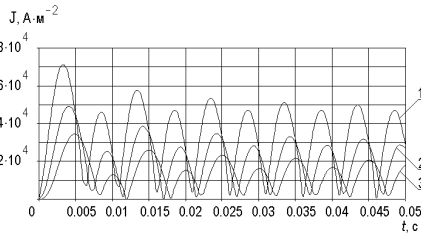


Рис. 5.

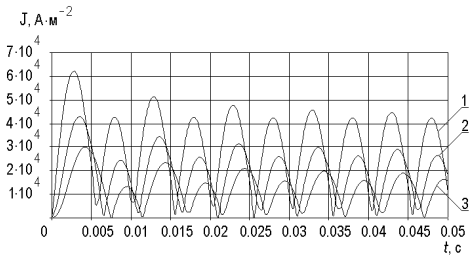


Рис. 6.

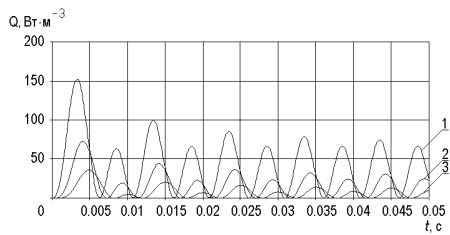


Рис. 7.

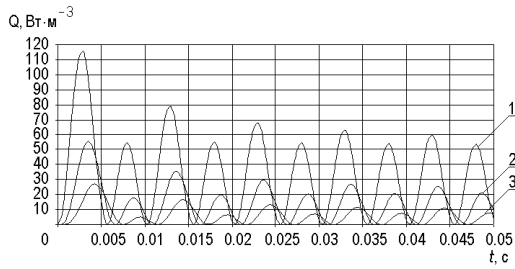


Рис. 8.

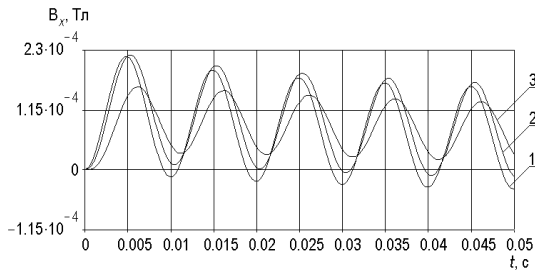


Рис. 9.

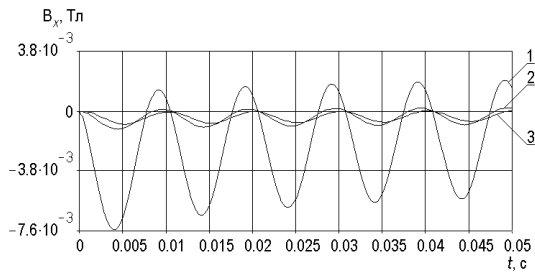


Рис. 10.

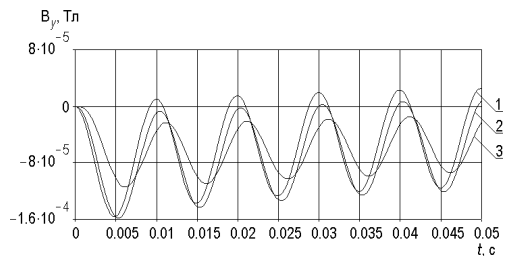


Рис. 11.

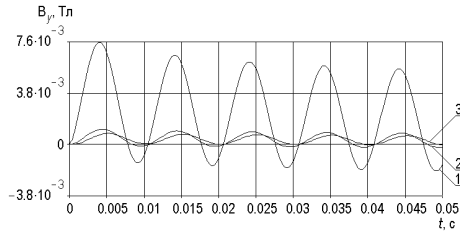


Рис. 12.

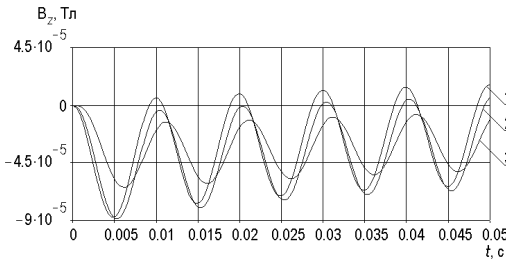


Рис. 13.

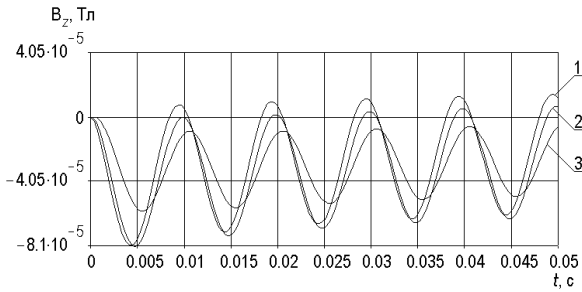


Рис. 14.

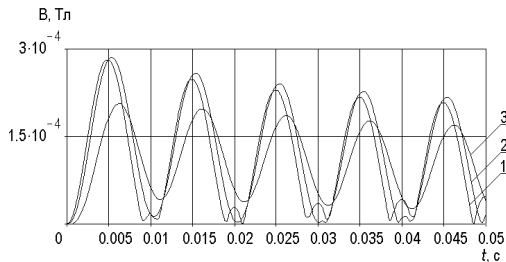


Рис. 15.

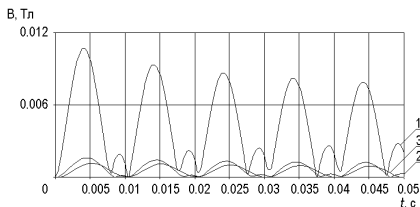


Рис. 16.

Отметим, что характер изменения во времени компонент и модуля напряженности магнитного поля \mathbf{H} качественно полностью совпадает с приведенными на рис. 9 – 16 графиками для индукции магнитного поля \mathbf{B} . При этом, в соответствии с (2), все величины напряженности магнитного поля рассчитываются путем деления соответствующих значений индукции магнитного поля на величину магнитной проницаемости вакуума μ_0 (для пазовых клиньев из дюралюминия).

Как следует из приведенных на рис. 5 – 16 результатов, электромагнитные процессы в рассматриваемом фрагменте ротора турбогенератора при коротком замыкании двух фаз являются существенно нестационарными и пространственными. К 50 мс переходной процесс стабилизируется [6]. Добавочные потери от вихревых токов на границе зазора между клиньями в 1,20 – 1,29 раза меньше, чем в теле клина (рис. 7, 8). На торцах рассматриваемого фрагмента ротора (в теле дюралюминиевых клиньев) имеет место следующее соотношение между абсолютными значениями амплитуд компонент индукции магнитного поля (рис. 9, 11, 13): $|B_x| > |B_y| > |B_z|$. При этом все компоненты имеют один порядок величин, и значения на правом торце фрагмента в 1,14 – 1,18 раз меньше, чем на левом. При этом на границах воздушного зазора между клиньями (рис. 10, 12, 14) компоненты индукции B_x и B_y практически не отличаются друг от друга по абсолютной величине, но имеют разные знаки и находятся практически в противофазе, а амплитуды осевой компоненты B_z на два порядка меньше, чем двух других (B_x и B_y). Это объясняется проанализированными ранее [6] особенностями пространственного распределения компонент векторного магнитного потенциала в рассматриваемом фрагменте конструкции ротора. Необходимо также отметить, что на границах воздушного зазора компоненты B_x и B_y многократно (в 33,0 – 47,5 раз) больше, чем на торцах фрагмента, в то время как компонента B_z изменяется незначительно по длине всего фрагмента (на 15,6 % от левого до правого торца).

Характер изменения модуля индукции магнитного поля (рис. 15, 16)

определяется компонентами рассматриваемой величины (рис. 9 – 14)

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}.$$

На границах воздушного зазора величина B значительно (в 12,9 – 38,7 раз) больше, чем на торцах фрагмента, что объясняется разными порядками величин B_z и B_x, B_y . При этом на границах зазора явление скин-эффекта проявляется сильнее (индукция магнитного поля быстрее уменьшается по глубине ротора), чем в теле клина.

Выводы. В статье описана методика расчета нестационарных электромагнитных полей методом конечных элементов в трехмерной постановке. С использованием разработанной методики исследованы особенности электромагнитных процессов в стыках пазовых клиньев синхронного турбогенератора при коротком замыкании двух фаз. Установлено, что на границах воздушного зазора между клиньями амплитуды осевой компоненты индукции магнитного поля на два порядка меньше, чем двух других, которые практически не отличаются друг от друга по абсолютной величине, но имеют разные знаки и находятся в противофазе. На границах зазора явление скин-эффекта проявляется сильнее (индукция магнитного поля быстрее уменьшается по глубине ротора), чем в теле пазового клина.

Предложенная методика и полученные результаты могут быть использованы для определения потерь от вихревых токов, момента и электромагнитных сил для последующей расчетной оценки теплового, термомеханического и вибрационного состояния и срабатывания ресурса электрических машин.

Список литературы: 1. Васьковский Ю.Н., Гайдено Ю.А., Цивинский С.С. Определение интегральных характеристик электрических машин методами теории электромагнитного поля // Электротехника и электромеханика. – 2006. – № 1. – С. 28-32. 2. Васьковский Ю.Н., Цивинский С.С., Гайдено Ю.А. Оптимизация концевых клиньев ротора турбогенератора для повышения надежности его работы в несимметричных режимах // Электротехника и электромеханика. – 2004. – № 3. – С. 26-28. 3. Кулон Ж.-Л., Сабонадьер Ж.-К. САПР в электротехнике. – М.: Мир, 1988. – 208 с. 4. Милых В.И., Поляков И.В., Полякова Н.В., Штангеев Е.И. Расчетно-экспериментальное тестирование программы Femm и преодоление проблем ее использования для расчета магнитного поля электрических машин // Электротехника и электромеханика. – 2004. – № 3. – С. 38 – 43. 5. Шульженко Н.Г., Сафонов А.Н., Пантелят М.Г., Руденко Е.К. Компьютерное моделирование нестационарного электромагнитного поля ротора турбогенератора в местах стыковки пазовых клиньев // Моделивання та інформаційні технології: матеріали Міжнар. наук. конф. "Моделивання 2010". – Київ, 12 – 14 травня 2010 р. – У 3 т. – Т 2. – С. 337-345. 6. Пантелят М.Г., Сафонов А.Н., Руденко Е.К., Шульженко Н.Г. Математическое модели-

рование нестационарных электромагнитных полей в фрагментах ротора синхронного турбогенератора // Проблемы машиностроения. – 2010. – Т. 13. – № 2. – С. 51-60. **7.** *Bíró O., Preis K.* On the use of the magnetic vector potential in the finite element analysis of three-dimensional eddy currents // IEEE Transactions on Magnetics. – 1989. – V. 25. – No. 4. – P. 3145-3159. **8.** *Bíró O., Preis K., Richter K.R.* Various FEM formulations for the calculation of transient 3D eddy currents in nonlinear media // IEEE Transactions on Magnetics. – 1995. – V. 31. – No. 3. – P. 1307-1312. **9.** *Pantelyat M.G.* Numerical analysis of impulse electromagnetic fields in soft ferromagnetic materials // International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics. – 1999. – V. 10. – P. 185-192. **10.** *Пантелейт М.Г., Шульженко Н.Г.* Использование векторного магнитного потенциала в конечноэлементном анализе нестационарных трехмерных электромагнитных полей в проводящих средах // Электротехника и электромеханика. – 2007. – № 5. – С. 42-47. **11.** *Сильвестер П., Феррари Р.* Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров-электриков. – М.: Мир, 1986. – 229 с. **12.** *Шульженко Н.Г., Зозулин Ю.В., Пантелейт М.Г., Руденко Е.К., Петушикова 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. **13.** *Шульженко Н.Г., Пантелейт М.Г., Руденко Е.К., Сафонов А.Н.* Расчет трехмерных стационарных магнитных полей методом конечных элементов // Электротехника и электромеханика. – 2009. – № 5. – С. 40-43. **14.** *Пантелейт М.Г., Руденко Е.К., Сафонов А.Н., Шульженко Н.Г.* Конечноэлементный анализ стационарных магнитных полей в трехмерной постановке // Вестник Харьк. нац. ун-та. Сер. "Математическое моделирование. Информационные технологии. Автоматизированные системы управления". – 2009. – Вып. 11. – № 847. – С. 292-306. **15.** *Jiayang D., Xubiao L., Feng L., Shiyou Y., Guangzheng N.* Negative sequence eddy current field analysis of a 1055 MVA turbogenerator by using 3D finite element model // Proc. of 8th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS'2005), Nanjing, China, September 2005. – P. 2075-2078.



Сафонов Олександр Миколайович у 2006 р. закінчив Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна зі спеціальності "Прикладна математика". Магістр кафедри "Математичного моделювання та програмного забезпечення". У 2009 р. закінчив аспірантуру зі спеціальності "Механіка деформівного твердого тіла" в Інституті проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України. Основним науковим інтересом є чисельний аналіз електромагнітних полів у тривимірному просторі, що виникають внаслідок роботи електричних машин.



Пантел'ят Михайло Гаррійович у 1985 р. закінчив Харківський політехнічний інститут зі спеціальності "Інженерна електрофізика". В 1990 р. захистив дисертацію на здобуття вченого ступеня кандидата фізико-математичних наук (спеціальність "Механіка де формівного твердого тіла"). З 1985 р. працює в Інституті проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України (у теперішній час – на посаді старшого наукового співробітника). Основні наукові інтереси – комп'ютерне моделювання електромагнітних, теплових та механічних процесів в електротехнічному устаткуванні різного призначення (електричні машини і апарати, обладнання для індукційного нагріву металу).



Руденко Олена Костянтинівна, кандидат технічних наук, науковий співробітник відділу вібраційних та термоміцнісних досліджень Інституту проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України. В 1971 р. захистила диплом інженера в Харківському політехнічному інституті за фахом динаміка та міцність машин. В 1990 р. захистила дисертацію на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук в Інституті проблем машинобудування НАН України за фахом механіка деформівного твердого тіла. Наукові інтереси пов'язані з дослідженням розподілу тривимірних нестационарних електромагнітних полів в елементах енергетичного і електротехнічного обладнання з використанням методу скінченних елементів для подальшого визначення температурного поля і термопружного стану конструкції.



Шульженко Микола Григорович, професор, доктор технічних наук. Захистив диплом інженера і дисертацію кандидата технічних наук в Харківському політехнічному інституті за фахом динаміка та міцність машин, відповідно в 1968 р., 1974 р. В 1992 р захистив дисертацію на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за цим же фахом в Інституті проблем машинобудування НАН України. Завідувач відділу вібраційних та термоміцнісних досліджень Інституту проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України з 1996 р. Наукові інтереси пов'язані з підвищенням надійності енергетичних машин, динамікою роторних машин, підвищенням ресурсу енергоблоків теплових та атомних електростанцій, створенням комп'ютерної системи контролю вібрацій турбоагрегатів спрямованої на підвищення надійності та оцінки залишкового ресурсу енергетичного обладнання.

Поступила в редколлегию 19.05.2010