УДК 621.313.333.+621.31.03+621.314

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ТЕПЛОВОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ДВУХВХОДОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

–––––––

ANALYSIS OF METHODS OF THERMAL RESEARCH TWO-INPUTELECTRIC MACHINES

Гайтов Багаудин Хамидович
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры электротехники и электрических машин,
Кубанский государственный
технологический университет
jlms@mail.ru

Гайтова Тамара Борисовна
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой электротехника,
Московский политехнический университет
gaytova@mail.ru

Шкода Валентин Васильевич
кандидат педагогических наук, доцент,
доцент кафедры электротехники и электрических машин,
Кубанский государственный
технологический университет
vshkoda@mail.ru

Суворов Виталий Сергеевич
студент,
Кубанский государственный
технологический университет
vetalmetal95@list.ru

Аннотация. Приведен анализметодов температурного поля, греющих потерь и эквивалентных тепловых схем для исследования теплопередачи в двухвходовых электрических машинах.

Ключевые слова: двухвходовая электрическая машина, теплопередача, температурное поле.

Gaytov Bagaudin Khamidovich
Doctor of technical sciences, Professor,
department of electrical engineering
and electrical machines,
Kuban state technological university
jlms@mail.ru

Gaytova Tamara Borisovna
Doctor of technical sciences, Professor,
Head of the department,
of electrical engineering,
Moscow polytechnic university
gaytova@mail.ru

Skoda Valentin Vasilyevich
Candidate of pedagogical sciences,
Associate professor, department
of electrical engineering
and electrical machines,
Kuban state technological university
vshkoda@mail.ru

Suvorov Vitaliy Sergeevich
Student,
Kuban state technological university
vetalmetal95@list.ru

Annotation. He analysis of temperature field of methods, these losses and equivalent thermal circuits to study heat transfer in two-inputelectric machines.

Keywords: two-inputelectric machine, heat transfer, thermal field.

Теплопередачу в двухвходовых электрических машинах ДЭМ [1–4]можно исследовать, воспользовавшись одним из известных методов: температурного поля, эквивалентных греющих потерь или эквивалентных тепловых схем.

Метод температурного поля [5–6 и др.] позволяет определить средний нагрев ДЭМ и его изменение в трех координатах при варьировании электромагнитных и аэрогидродинамических параметров охлаждающей среды.

Метод эквивалентных греющих потерь [7–9] позволяет определить средние превышения температуры активных частей ДЭМ.

Метод эквивалентных тепловых схем [5, 7, 8, 10] позволяет определить средние температуры элементов ДЭМ и их изменение при широком варьировании электромагнитных и аэрогидродинамических параметров машины. Судя по литературным данным, этот метод следует считать основным при практическом исследовании температурного режима электрических машин вообще и ДЭМ в частности, и одновременно в большей степени, чем для общепринятых ЭМ, что объясняется непрерывностью переходных процессов в ДЭМ.

В общем случае нестационарное температурное поле электрической машины является трехмерным и описывается дифференциальным уравнением теплопроводности [6, 11]

$$c\gamma\frac{\partial\vartheta}{\partial t}=\lambda_x\frac{\partial^2\vartheta}{\partial x^2}+\lambda_y\frac{\partial^2\vartheta}{\partial y^2}+\lambda_z\frac{\partial^2\vartheta}{\partial z^2}+p_0\,, \qquad (1)$$

где c – теплоемкость элемента объема машины, Дж/ (ºС • м^3); y – удельная масса элемента, кг/м^3; ϑ – температура элемента, ºС; $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ – теплопроводность элемента вдоль координат x, y, z, Вт/(м ºС); p_0 – производительность единицы объема или удельная мощность источника тепла, Вт/м.

Уравнение теплопроводности (1) устанавливает связь между изменениями температуры в пространстве и во времени и описывает процесс переноса тепла внутри тела.

Решение уравнения (1) предполагает, что температура внутри тела является непрерывной функцией места (x, y, z) и времени (t) и что ее первая производная по времени, и первая и вторая производные по координатам также непрерывны.

Единственность решения дифференциального уравнения обеспечивается, как известно, если только заданы краевые условия. В данном случае это условие распределения температуры на границе тела и охлаждающей среды (граничное условие) и условие в начальный момент времени (начальное условие или временное краевое условие).

Граничные условия, а по существу, пространственные краевые условия, могут быть заданы по одному из четырех известных типов:

– граничные условия первого рода, когда на поверхности тела задано распределение температуры в любой момент времени

$$\vartheta_{пов} = \varphi(t); \tag{2}$$

– граничные условия второго рода, когда на поверхности тела заданы значения производных

$$\frac{\partial\vartheta}{\partial x} = \psi_1(t);\ \frac{\partial\vartheta}{\partial y} = \psi_2(t);\ \frac{\partial\vartheta}{\partial z} = \psi_3(t); \tag{3}$$

– граничные условия третьего рода, когда на поверхности тела задано линейное соотношение между производной и функцией, например в направлении оси O_x

$$\left.\frac{\partial\vartheta}{\partial x}\right|_{X=L} = -\frac{\alpha}{\lambda}\left[\vartheta_L(t) - \vartheta_C(t)\right], \tag{4}$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м^2 • ºС); ϑ_L, ϑ_C – температуры поверхности тела и окружающей среды соответственно, ºС;

– граничное условие четвертого рода, когда при плотном контакте двух тел тепловой поток через поверхность соприкосновения может иметь лишь единое для обоих тел значение, т.е.

$$\lambda_1\left(\frac{\partial\vartheta_1}{\partial x}\right) = \lambda_2\left(\frac{\partial\vartheta_2}{\partial x}\right), \tag{5}$$

где λ_1, λ_2 – теплопроводности двух плотно соприкасающихся тел, Вт/(м • ºС); ϑ_1, ϑ_2 – температура этих двух тел, ºС.

В двухвходовых электрических машинах используются практически все приведенные граничные условия. Так, например, на границе «пазовая часть обмотки – сердечник магнитопровода» обычно используются граничные условия четвертого рода, на границе «сердечник статора – хладоагент и узлы машины» – граничные условия третьего рода.

Однако даже при задании конкретных краевых задач уравнение теплопроводности (1) не может быть решено для нестационарного температурного поля в трехмерном анизотропном пространстве. Поэтому в практике обычно эту задачу упрощают. Так, при установившемся режиме работы (5.28) преобразуется к более простому виду с учетом, что $\frac{\partial\vartheta}{\partial t} = 0$

$$\lambda_x\frac{\partial^2\vartheta}{\partial x^2} + \lambda_y\frac{\partial^2\vartheta}{\partial y^2} + \lambda_z\frac{\partial^2\vartheta}{\partial z^2} = 0, \tag{6}$$

При двух- и одномерных задачах уравнение теплопроводности, естественно, еще более упрощается, а результаты расчета становятся все менее точными. Эти или иные упрощения при задании условий практически всегда необходимы, ибо, как известно, решение неоднородных дифференциальных уравнений вида (1) представляет определенные трудности.

Тем не менее, можно утверждать, что решение неоднородных уравнений [9] вида

$$\Delta\vartheta_п = R_п Q_п, \tag{7}$$

приводит к сложным, громоздким и физически трудно истолковываемым формулам. Кроме того, эти получаемые решения, как и сами уравнения, настолько схематизируют реальный процесс теплообмена в машине, что в большинстве случаев не могут считаться вполне точными.

Метод эквивалентных греющих потерь, хотя и проще, но по своей природе не может обеспечить достаточную точность и наглядность.

Всех указанных недостатков, на наш взгляд, лишен метод эквивалентных тепловых схем, при котором неизбежна, и вместе с тем в допустимых пределах, неточность результата, которая оправдывается простотой и наглядностью самого метода расчета, т.е. практической целесообразностью самого метода.

Метод эквивалентных тепловых схем разработан в 1931 г. Р. Зодербергом и в отечественную практику электромеханики внедрен академиком М.П. Костенко. Суть этого метода заключается в эквивалентной замене элементов поля с внутренними источниками тепла элементами без внутренних источников [6, 12, 13]. Это по существу означает замену уравнения Пуассона

$$\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{p_0}{\lambda} = 0, \tag{8}$$

уравнением Лапласа:

$$\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} = 0 \tag{9}$$

при решении одномерной стационарной задачи при таком преобразовании размеров элемента (т.е. координаты x), которое приводило бы к искомому численному результату.

Переход от одномерной задачи к двухмерной осуществляется на втором этапе по правилам сложения сопротивлений получаемой на первом этапе линейной электрической цепи.

Для решения нестационарных задач была разработана [7, 8, 13] классическая теория нестационарного нагрева, которая рассматривает электрическую машину или ее элемент как однородное тело бесконечной теплопроводности, окруженное бесконечно теплоемкой средой. При таком рассмотрении уравнение теплопроводности дает решение в виде экспоненциальной зависимости температуры от времени.

В силу указанных выше достоинств, классическая теория нестационарного нагрева получила широкое распространение, как позволяющая получить достаточно надежный численный анализ многих неустановившихся тепловых процессов, в том числе режимов повторно-кратковременной нагрузки машин.

Последнее особенно важно для ДЭМ, поскольку они, как правило, работают в непрерывном переходном режиме недетерминированного характера. Такой режим можно рассматривать как общий случай всех определяемых ГОСТом 183-74 режимов работы электрических машин, включая повторно-кратковременный.

Как результат сравнения метода эквивалентных тепловых схем и более точного метода температурного поля при решении двухмерных тепловых задач Р. Зодерберг [12] приводит сопоставление результатов расчета, согласно которым расхождение в определении средней температуры не превышает 4 %, максимальной температуры – 7,5 %.

Естественно, такая точность метода эквивалентных тепловых схем вполне удовлетворительна, и это еще раз подтверждает нашу правильную ориентацию в выборе именно этого метода для исследования теплового режима ДЭМ.

К сказанному следует добавить, что эквивалентные тепловые схемы могут успешно применяться также для решения задач с трехмерным тепловым полем. Причем, именно в этом случае данный метод превосходит практически все известные методы теплового расчета.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Краснодарского края в рамках научного проекта № 16-48-230200 «р_а».

Литература:

1. Двухмерная электрическая машина-генератор для автономных систем электроснабжения / Б.Х. Гайтов, А.В. Самородов, Л.Е. Копелевич, Я.М. Кашин // Наука. Техника. Технологии. (Политехнический вестник). – 2013. – № 1–2. С. 66–69.

2. Пат. RUS № 2450411 Аксиальная двухвходовая бесконтактная электрическая машина-генератор / Б.Х. Гайтов, Я.М. Кашин, Т.Б. Гайтова, А.Я. Кашин, Д.В. Пауков, А.В. Голощапов. – Опубл. 12.01.2011 г. – Бюл. № 13.

3. Пат. RUS № 2561504 Аксиальный двухвходовый бесконтактный ветро-солнечный генератор / Б.Х. Гайтов, Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, Л.Е. Копелевич, А.В. Самородов. – Опубл. 16.06.2014.

4. Двухвходовая электрическая машина – эффективное средство комплексирования энергии солнца и ветра в системах автономного электроснабжения / Б.Х.Гайтов, Я.М. Кашин, Л.Е. Коплевич, А.В. Самородов / материалы VI Международной научно-практической конференции «Актуальные направления фундаментальных и прикладных исследований» : North Charlston, USA (22–23 июня 2015 г.). – Изд. CreateSpace, 2015. – С. 133–138.

5. Гуревич Э.И. Тепловые испытания и исследования электрических машин. – Л. : Энергия, 1977. – 294 с.
6. Счастливый Г.Г., Бандурин В.В., Остапенко В.Н., Остапенко С.Н. Математические модели теплопередач в электрических машинах. – Киев : Наукова думка, 1986. – 184 с.
7. Богаенко И.Н. Исследование тепловых процессов в электрических машинах для целей диагностики : дис. … д-ра техн. наук. – Киев, 1979. – 373 с.
8. Васильев Ю.К. Теория и инжекторные методы расчетов тепловых процессов в электрических двигателях : дис. … д-ра техн. наук. – М. : МЭИ, 1969. – 43 с.
9. Гайтова Т.Б., Кашин Я.М. Нетрадиционные электротехнические комплексы (теория, расчет и конструкции). – Краснодар : КВАИ , 2004. – 403 с.
10. Готтер Г. Нагревание и охлаждение электрических машин / пер. с нем. под ред. В.В. Мальцева. – М., Л. : Госэнергоиздат, 1961. – 480 с.
11. Яковлев А.И. Теплообмен в электрических машинах малой и средней мощности и теплофизические основы их проектирования : дис. … д-ра техн. наук. – Харьков, 1980. – 500 с.
12. Soderberg R. Steady flow of heat in large turbine-generators // «Transactions AIEE». – 1931. – June. – P. 787–802.
13. Гайтов Б.Х., Кашин Я.М., Копелевич Л.Е. Температурные режимы работы двухмерных электрических машин. Особенности теплообмена // сб. мат. межд. науч.-практ. конф. «Технические и технологические системы». – Краснодар, 2016. – С. 64–69.

References:

1. The two-dimensional electrical machine generator for autonomous systems of electrical power supply / B.H. Gaytov, A.V. Samorodov, L.E. Kopelevich, Ya.M. Kashin // Science. Engineering. Technology (Polytechnical messenger). – 2013. – No. 1–2. – P. 66–69.
2. Patent RUS No. 2450411 Axial two-input noncontact electrical machine generator / B.H. Gaytov, Ya.M. Kashin, T.B. Gaytova, A.Ya. Kashin, D.V. Paukov, A.V. Goloshchapov. – Publ. 12.01.2011 – Bulletin No. 13.
3. Patent RUS No. 2561504 Axial dvukhvkhodovy noncontact vetro-solar generator / B.H. Gaytov, Ya.M. Kashin, A.Ya. Kashin, L.E. Kopelevich, A.V. Samorodov. – Publ. 16.06.2014.
4. The two-input electrical machine – an effective remedy of integration of energy of the sun and wind in systems of independent electrical power supply / B.Kh. Gaytov, Ya.M. Kashin, L.E. Koplevich, A.V. Samorodov / materials VI of the International scientific and practical conference «Urgent Directions of Basic and Applied Researches» : North Charlston, USA (on June 22–23, 2015). – Prod. CreateSpace, 2015. – P. 133–138.
5. Gurevich E.I. Heat tests and researches of electrical machines. – L. : Energy, 1977. – 294 p.
6. Schastlivi G.G., Bandurin V.V., Ostapenko V.N., Ostapenko S.N. Mathematical models of heat transfers in electrical machines. – Kiev : Naukova thought, 1986. – 184 p.
7. Bogayenko I.N. A research of thermal processes in electrical machines for the purposes of diagnostics : yew. … dr. sci. tech. – Kiev, 1979. – 373 p.
8. Vasilyev Yu.K. The theory and injector methods of calculations of thermal processes in electrical engines : yew. … dr. sci. tech. – M. : MEI, 1969. – 43 p.
9. Gaytova T.B., Kashin Ya.M. Non-traditional electrotechnical complexes (theory, calculation and constructions). – Krasnodar : KVAI, 2004. – 403 p.
10. Gotter G. Heating up and cooling of electrical machines / under the editorship of V.V. Maltsev. – M, L. : Gosenergoizdat, 1961. – 480 p.
11. Yakovlev A.I. Heat exchange in electrical machines of low and average power and heatphysical bases of their design : dis. … dr. sci. tech. – Kharkiv, 1980. – 500 p.
12. Soderberg R. Steady flow of heat in large turbine-generators. «Transactions AIEE». – 1931. – June. – P. 787–802.
13. Gaytov B.H., Kashin Ya.M., Kopelevich L.E. Temperature conditions of operation of two-dimensional electrical machines. Features of heat exchange // collection mat. international scientific conference «Technical and technological systems». – Krasnodar, 2016. – P. 64–69.