Учёные записки
Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета
№ III-1 (23)
2015

Ким К. К., Мартьянов М. В., Иванов С. Н., Просолович А. А.
K. K. Kim, M. V. Martjanov, S. N. Ivanov, A. A. Prosolovitch

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ТЕПЛООТВОДА В ЭЛЕМЕНТАХ ГЕРМЕТИЧНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

THE PROBLEM RESEARCH OF HEAT RESISTANCE IN THE ELEMENTS OF HERMETIC ELECTROMECHANICAL CONVERTERS

Ким Константин Константинович – член-корреспондент АЭН РФ, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретические основы электротехники» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Россия, Санкт-Петербург); 190031, Санкт-Петербург, Московский пр.,9. E-mail: kimkk@inbox.ru.
Kim Konstantin Konstantinovich – member of Russian Academy of electrical engineering, Dr. Sc. (Eng), professor, Head of Department of Petersburg State Transport University of Emperor Alexander I (Russia, Saint-Petersburg); 190031, Saint-Petersburg, Moscowsky av., 9. E-mail: kimkk@inbox.ru.

Мартьянов Михаил Васильевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электромеханические комплексы и системы» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Россия, Санкт-Петербург); 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9.
Mr. Michail V. Martjanov – Associate Professor of Department of Petersburg State Transport University of Emperor Alexander I (Russia, Saint-Petersburg); 190031, Saint-Petersburg, Moscowsky av., 9.

Иванов Сергей Николаевич – доктор технических наук, доцент, начальник учебно-методического отдела Института новых информационных технологий Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681021, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Котовского, 1-60. E-mail: isn@initkms.ru.
Mr. Sergey N. Ivanov – Doctor of Engineering, head of educational Department, Institute of new information technologies Komsomolsk-on-Amur State Technical University. (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681021, Komsomolsk-on-Amur, Kotovsky str. 1-60. E-mail: isn@initkms.ru.

Просолович Алексей Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы автоматизированного проектирования» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681014, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Калинина, 41-40. E-mail: alpr72@mail.ru.
Mr. Aleksey A. Prosolovitch – Associate Professor, Department of Mechanical Engineering Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University$ (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681014, Komsomolsk-on-Amur, Kalinin str. 41-40. E-mail: alpr72@mail.ru.

Аннотация. В статье рассматриваются теоретические основы устойчивости процесса теплообмена в элементах герметичных электромеханических преобразователей. Приведены краткие результаты анализа расчетных методов, позволяющих проводить оценку влияния гидродинамических и тепловых параметров на исследуемые режимы работы энергетического оборудования с непосредственным охлаждением экранирующих элементов. Обосновывается выбор определяющих факторов и производится постановка задачи исследования с использованием универсальных программных сред.

Summary. The article discusses the theoretical basis of sustainability of the process of heat exchange elements in a sealed Electromechanical transducers. Brief results of the analysis of the computational methods that allow the assessment of the influence of hydrodynamic and thermal parameters of the investigated modes of operation of power equipment with direct cooling of the shielding elements. The selection of the determinants and made formulation of research objectives with the use of universal software environments.

Ключевые слова: герметичный электромеханический преобразователь, теплообмен, устойчивость, вектор скорости, температурное поле.

Key words: sealed electromechanical converter, heat transfer, stability, velocity vector, temperature field.

УДК 621.31: 621.25

Введение

Электромеханические преобразователи (ЭМП) традиционно составляют основу современных электротехнических комплексов, применяемых в различных сферах человеческой деятельности. Наиболее востребованными в настоящее время являются ЭМП, спроектированные с максимальным учетом условий удаленной эксплуатации. Наглядным примером такого оборудования являются разработки герметичных устройств, реализуемые крупнейшими мировыми производителями «Siemens», «Франклин Электрик Ойропа ГмбХ» и рядом других. В частности, фирмой «Siemens» предложен и испытан капсулированный компрессорный агрегат STC&ECO, обладающий повышенной безопасностью, увеличенным временем безотказной работы, длительным периодом межремонтного обслуживания (до 5 лет). Очевидно, что переход к герметичным (или капсулированным) электромеханическим преобразователям (ГЭМП) целесообразен и для отечественных объектов энергетики, нефтегазодобычи, транспорта [1, 2]. Более высокая стоимость герметичного устройства полностью компенсируется его надежной работой в самых тяжелых условиях даже без учета возможных простоев и ущерба при эксплуатации оборудования с более низкими степенями защиты от воздействия окружающей среды.

Повышение надежности наряду с возможностью увеличения удельной мощности по сравнению с однотипными преобразователями традиционного исполнения обеспечивается конструкцией ГЭМП, особенностью которой является наличие тонкостенного немагнитного цилиндрического экрана, охватывающего первичную обмотку. В большинстве случаев использование экрана из материала с высоким удельным электрическим сопротивлением практически не влияет на эксплуатационные характеристики преобразователя, однако при определенных условиях в нем могут выделяться дополнительные тепловые потери. Поскольку повышение теплового сопротивления между первичной обмоткой и экраном нецелесообразно, основным способом снижения температуры и устранения ее влияния на неподвижную часть ЭМП является непосредственное охлаждение экрана и утилизация отводимой тепловой мощности. Обеспечение эффективного теплоотвода в пространстве, ограниченном зазором между поверхностью экрана и вращающимся ротором, представляет собой сложную задачу, направленную на установление основных закономерностей процессов теплообмена с учетом конструктивных особенностей ГЭМП [3].

Постановка задачи исследования

Принципиальной трудностью реализации ГЭМП является целесообразность одновременного снижения влияния экрана на электромагнитные характеристики преобразователя, что уже на стадии проектирования приводит к необходимости минимизации зазора, и обеспечения достаточной интенсивности теплоотвода в условиях стесненной конвекции. Априорный анализ проектных параметров, определяющих теплообменные процессы в рассматриваемой области, показывает, что их можно разделить на две группы. Первая включает геометрические величины, к которым относятся внешний и внутренний диаметры d_1, d_2, длины капсулированного статора l_1 и ротора l_2, толщина экрана Δ, величина зазора δ, характеристи-

ки профиля. Вторая группа – температура, скорость перемещения и физико-химические свойства охлаждающей жидкости.

При этом практика проектирования объектов энергетического машиностроения показывает:

- с уменьшением длины возрастает давление на отдельные элементы конструкции и возрастает расход хладагента через торцевые части;
- с увеличением длины возрастают потери на трение, следовательно, тепловые потери и ухудшается тепловой режим;
- малые соотношения *l/d* компенсируют неточности изготовления и монтажа.

Важным этапом расчета является выбор величины зазора:

- при малых зазорах легче обеспечивается гидродинамический режим работы, т.е. возрастает несущая способность и уменьшается минимально допустимая скорость вращения;
- при малых δ снижается опасность самовозбуждения автоколебаний;
- при малых зазорах давление более равномерно распределено на поверхности, следовательно, среднее расчетное давление меньше отличается от максимального;
- уменьшение зазора ведет к возрастанию потерь на трение и росту температуры;
- с уменьшением зазора снижается расход охлаждающей жидкости и ужесточается тепловой режим;
- при малых зазорах повышаются требования к точности изготовления и ее стоимость.

Очевидно, что учет только геометрических факторов при оценке эффективности теплообмена в зазоре ГЭМП уже представляет задачу, не имеющую однозначного аналитического решения вследствие своей избыточности. Для ее конкретизации на начальном этапе наиболее целесообразно использование методов имитационного моделирования, обеспечивающих не только учет размерных соотношений и профиля ограничивающих поверхностей, но и динамических характеристик режима работы ГЭМП, в частности, температуры экрана и скорости движения охлаждающей жидкости. В качестве программных продуктов, предназначенных для решения рассматриваемой задачи, можно использовать, например, ANSYS - универсальный пакет конечно-элементного анализа; для двумерных геометрических моделей интегрируемый в Matlab пакет Femlab; для гидродинамического расчета с использованием CFD-технологий пакет Solidworks, обеспечивающий анализ потока охлаждающих жидкостей (модуль Solidworks Flow Simulation) и содержащий интегрированные средства гидрогазодинамики и теплообмена. Пакет ANSYS является наиболее мощным и позволяет учитывать даже фазовый переход жидкости, но при этом имеет сложный интерфейс и большое число параметров настройки программы. Пакет Solidworks обеспечивает возможность моделирования течения несжимаемой жидкости при любых числах Рейнольдса, создание расчетной параметрической трехмерной модели ГЭМП и формирование по ней расчетной сетки непосредственно по модели Solidworks, автоматическое создание расчетной области, задание составляющих скорости в объемах.

Исходным выражением в любом из используемых пакетов является уравнение теплопередачи, учитывающее явление вынужденной конвекции:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \mathrm{div}\left(-\lambda\, grad\Theta + \rho c_p \Theta u\right) = q\,, \qquad (1)$$

где c_p – удельная теплоемкость жидкости; ρ – ее плотность; Θ – температура; u – векторное поле скорости движения жидкости.

В уравнении (1) в скобках представлена плотность потока тепловой мощности. Она состоит из двух составляющих – кондуктивной и конвективной. Конвективная компонента (второе слагаемое) пропорциональна вектору скорости и связывает температуру экрана и скорость вращения ротора. При рассмотрении стационарного режима из уравнения (1) исключается слагаемое с производной температуры от времени. Несмотря на это, в свойствах

жидкости необходимо указывать значения теплоемкости и плотности, так как от них зависит количество энергии, которая переносится потоком жидкости.

Гидродинамический процесс перемещения охлаждающей жидкости в области исследования без учета теплообмена описывается системой уравнений движения (Навье-Стокса) и неразрывности:

$$\rho_{ж}\left(\frac{\partial u_i}{\partial t}+u_j\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right)=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j}+Q_i,\qquad i,j=\overline{1\dots 3},$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i}=0,$$

где $\rho_{ж}$ – плотность жидкости; u_i – скорость жидкости в направлении оси i; x_i – координата области расчета; p – давление; Q_i – составляющая объемных гравитационных сил; σ_{ij} – тензор турбулентных напряжений, определяемый по формуле

$$\sigma_{ij}=\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right),$$

где $\mu=\nu\rho_{ж}$ – динамическая вязкость, ν – кинематическая вязкость, определяемая суммой молекулярной ν_m и турбулентной ν_t вязкостей.

Поскольку точное решение уравнений движения (Рейнольдса) и неразрывности для неустановившегося трехмерного турбулентного движения в рассматриваемой постановке отсутствует, то возникает необходимость перехода от действительных скоростей к их средневременным значениям, связанным с первыми пульсационными проекциями.

Определение особых условий устойчивости

Анализ режимов работы ГЭМП позволяет сформулировать следующие критерии устойчивости теплоотвода, учитываемые при задании начальных и граничных условий:

- отсутствие радиального градиента температуры в характерных точках сечения зазора между экраном и вращающимся ротором, $grad\,\Theta=0$;

- превышение допустимой температуры внутренней поверхности экрана, $\Theta_э \geq \Theta_{max}$;

- межфазные изменения в охлаждающей жидкости и снижение интенсивности теплообмена, $a \to min$ (a – коэффициент температуропроводности).

Теоретический анализ устойчивости теплообмена

Теоретическое исследование гидродинамических течений в рассматриваемой области ГЭМП требует численного решения приведенных выше уравнений, описывающих режимы, ведущие к потере устойчивости с помощью построения гипотетических теорий или использованием асимптотических методов. Если режим движения жидкости рассматривать в виде течения Куэтта-Тейлора, то его можно характеризовать двумя составляющими скорости – осевой и радиальной, получаемыми из решения уравнений Навье-Стокса. Течение Куэтта-Тэйлора в зазоре между экраном и вращающимся ротором имеет форму ориентированных в осевом направлении встречных тороидальных вихрей, которые при критических значениях параметров вращения приводят к неустойчивости теплообмена (потеря устойчивости первого типа) [4].

Процесс теплообмена поверхности экрана с охлаждающей жидкостью в первом приближении (без учета краевых эффектов) может оцениваться по радиальной составляющей абсолютной скорости [3]. Очевидным критерием устойчивости этого процесса является переход к пленочному кипению и резкое снижение коэффициента теплоотдачи (потеря устойчивости второго типа).

Таким образом, решение рассматриваемой задачи сводится к определению гидродинамических и тепловых параметров, которые соответствуют двум типам потери устойчивости теплообмена в зазоре ГЭМП. При этом следует отметить, что наличие радиального потока жидкости от экрана к вращающемуся ротору не позволяет непосредственно использовать

результаты классических исследований, основанных на предположении, что потеря устойчивости первого вида возникает вследствие вторичных стационарных течений, не зависящих от отдельных объемных составляющих (вихри Тейлора). Существование принципиально более сложных течений жидкости (автоколебания с нелинейными волнами, апериодические мультичастотные и турбулентные случайные пульсации) указывает на необходимость учета зависимости интенсивности радиальной составляющей скорости потока, являющейся причиной бифуркации возникновения вторичных вихрей, от величины критерия Рейнольдса для радиальной скорости. Использование теории бифуркаций в рассматриваемой задаче позволяет проследить последовательность возникновения и развития трехмерных вихрей путем решения исходных нестационарных трехмерных уравнений Навье-Стокса прямым численным моделированием (ПЧМ) без осреднения скоростей в потоке. Этот метод требует высокого разрешения пространственных и временных широкоспектральных составляющих вихрей и соответственно существенных программно-аппаратных ресурсов, что сужает прикладную область анализом течений при значениях *Re* меньших 10^3, т.е. ламинарными и частично смешанными течениями априорно несоответствующих турбулентному характеру движения жидкости. Поэтому хотя ПЧМ имеет большие перспективы в ряде случаев целесообразно использовать другие промежуточные вычислительные алгоритмы. Одним из вариантов является спектральная фильтрация составляющих скорости, приводящая к разложению переменных в уравнениях Навье-Стокса с использованием масштабируемого фильтра.

Другой метод – моделирование отсоединенных вихрей – объединяет расчет безотрывных течений с расчетом потоков с протяженными отрывными областями.

При оценке потери устойчивости второго типа решается уравнение теплопереноса (1), выраженное через средневременные значения скоростей и температуры. Основными допущениями при этом являются отсутствие теплопереноса конвекцией средними составляющими скорости и исключительный теплообмен пульсациями вихрей, кроме этого теплофизические характеристики охлаждающей жидкости задаются для температуры экрана.

Предварительный анализ зависимости потери устойчивости первого типа показывает, что наиболее значимым фактором может быть выбрана окружная скорость вращающегося ротора, непосредственно определяющая радиальную составляющую и число Рейнольдса. Соответственно в качестве функции отклика принимается плотность вихрей, т.е. их количество на единицу длины экрана в осевом направлении. Для количественного учета факторов, приводящих к потере устойчивости второго типа, необходима информация о распределении тепловых полей в элементах ГЭМП. В частности, при выборе краевых условий могут быть использованы результаты критериального анализа зависимости температуры экрана от его толщины при различной частоте питающего напряжения [5].

Заключение

Проведенный анализ основных факторов и режимов, теоретически характеризующих возможность потери устойчивости теплообмена в элементах герметичных электромеханических преобразователей, показал, что при ее исследовании необходимо рассматривать одновременно два процесса: один обусловлен турбулентным движением охлаждающей жидкости в зазоре между поверхностью экрана и вращающимся ротором, второй – наличием распределенного источника тепловой мощности. В качестве основных независимых переменных соответственно могут выбраны радиальная компонента скорости движения в исследуемой области и начальная температура внутренней поверхности экрана.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ким, К. К. Analysis of the influence of design factors on the winding reliability of the heating electromechanical transdusers / К. К. Ким, Н. С. Карпова, О. В. Приходченко // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2013. – Вып. 2(35). – С. 26-31.

2. Анализ влияния конструкционных факторов на надежность герметичных электромеханических преобразователей / К. К. Ким, Д. А. Голоколос, Н. С. Карпова, С. Н. Иванов // Ученые записки Ком-

сомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2013. – № IV-1(16). – С. 29-34.
3. Иванов, С. Н. Энергетические соотношения в герметичных электротехнических комплексах специального назначения / Д. А. Голоколос, Г. М. Гринфельд, С. Н. Иванов // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2014. – № III-1(19). – С. 4-10.
4. Колесов, В. В. Расчет стационарных, периодических и квазипериодических движений вязкой жидкости между двумя вращающимися проницаемыми цилиндрами / В. В. Колесов, М. Н. Романов // Механика жидкости и газа – 2010. – № 6. – С. 53-62.
5. Приходченко, О. В. Математическое моделирование и анализ электромагнитных и тепловых процессов в электромеханических теплогенерирующих преобразователях / О. В. Приходченко // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2011. – № III-1(7). – С. 27-37.