

ВЫБОР МЕТОДА РАСЧЕТА ТРЕХМАШИННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Кондрашов Дмитрий Андреевич, аспирант, Национальный исследовательский университет «МЭИ» Россия, 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1. e-mail: KondrashovDA@mpei.ru

Ширинский Сергей Владимирович, к.т.н., доцент, Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия, 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1. e-mail: ShirinskiiSV@mpei.ru

Аннотация. В настоящее время происходит рост использования электроэнергии во всех отраслях промышленности. Не является исключением и транспортная сфера, где помимо наземной инфраструктуры большое внимание уделяется повышению уровня электрификации самих подвижных объектов, например, летательных аппаратов. В статье представлен выбор необходимой методики проведения поверочных расчетов, основанный на исследовании реального авиационного генератора, рассмотрены особенности выбранного образца, проанализированы ранее применяемые методики проведения расчетов.

Ключевые слова: электрическая машина, генератор, электрический самолет, метод зубцовых контуров, поверочный расчет.

CHOICE OF CALCULATION METHOD FOR THREE-MACHINE GENERATORS

Kondrashov Dmitriy Andreevich, postgraduate, National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Russia, 111250, Moscow, Krasnokazarmennaya, 14, build.1, e-mail: KondrashovDA@mpei.ru

Shirinskii Sergey Vladimirovich, Ph.D., Associate Professor, National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Russia, 111250, Moscow, Krasnokazarmennaya, 14, build.1, e-mail: ShirinskiiSV@mpei.ru

Abstract. Nowadays one can see an increase in the use of electricity in all industries. The transport sector is not an exception, where in addition to ground infrastructure much attention is paid to increasing the level of electrification of the mobile objects themselves, for example, the aircraft. The article presents the choice of the necessary methodology for carrying out verification calculations, based on the study of a real aircraft generator, considers the main features of the selected machine and analyzes the previously used calculation methods.

Keywords: electric machine, generator, all electric aircraft, tooth contour method, verification calculation.

В XXI веке наблюдается существенный рост производства и потребления электроэнергии, который вызывает необходимость совершенствования электроэнергетических систем, внедрения электрических машин в существующие энергетические установки и все большее и большее количество технологических процессов, расширяя тем самым области применения устройств с электромеханическими преобразователями. Создание современных энергетических систем, электромеханических установок, изделий, включающих в себя электрические машины, требует совершенствования уровня их качества при повышении их экологичности. Показатели качества ЭМ объединяют не только традиционные характеристики расхода материалов при изготовлении, КПД, надежность, трудоемкость, стоимость в производстве и обслуживании, но и стоимость и ресурсоемкость

всех элементов и узлов электрических машин. [1]

При проведении научно-исследовательских и проектно-конструкторских работ по созданию ЭМ и установок с ними неизбежен этап моделирования, позволяющий с минимальными затратами рассмотреть показатели и режимы работы агрегатов как автономно, так и в совокупности, например, в составе систем [1].

При проектировании устройств систем генерирования остро стоит вопрос о выборе необходимых методик расчетов. Данная проблема затрагивает все сферы промышленности, не обходя стороной и авиационную сферу. Так при создании новейших летательных аппаратов достаточно большое внимание уделяется разработкам единой централизованной системы электроснабжения из-за увеличения числа бортовых потребителей электроэнергии, поскольку все большее число систем летательных аппаратов переводятся в разряд электрических систем. Безусловно, таким образом, растет и суммарная мощность всех потребителей. Такой рост потребления приводит к необходимости увеличения мощности устройств, производящих эту самую энергию. На борту к таким устройствам относятся электрогенераторы. Чем больше мощности смогут выдавать первичные источники энергии, тем больше систем можно перевести в разряд электрических. С этого времени можно остро поднимать вопрос о создании перспективных разработок воздушных судов в виде полностью электрифицированного самолета (ПЭС), а на начальном этапе – более электрифицированного самолета (БЭС) [2].

Конструкция бортовой системы электроснабжения летательных аппаратов состоит из таких элементов, как:

- аппаратура защиты, управления и регулирования;
- оборудование защиты от радиопомех, статического электричества и электромагнитных излучений источников тока;
- бортовая сеть с распределительными элементами;
- средства защиты цепей потребителей.

В составе бортовой сети выделяют первичные и вторичные источники электроэнергии. Основными агрегатами систем электроснабжения, применяемыми в качестве первичных источников электропитания на борту летательных аппаратов, являются генераторы переменного тока. Важнейшими аспектами при разработке таких устройств являются их бесконтактность, высокая удельная мощность, перегрузочная способность, надежность [2].

Одним из примеров такого агрегата служит синхронный генератор (рис. 1), предназначенный для использования на борту самолетов в качестве аварийного генератора, приводимый в движение от воздушного винта, вращаемого набегающим потоком воздуха. Основные типичные для аварийных генераторов технические характеристики приведены в таблице 1.

Выбранный агрегат (рис. 2) представляет собой шестиполусный бесщеточный генератор со встроенным трехфазным возбудителем и блоком вращающихся выпрямителей, предназначенным для питания обмотки возбуждения основного генератора постоянным током. Для осуществления автономности возбуждения, а также для питания цепей защиты и управления на одном валу с генератором и возбудителем размещен трехфазный подвозбудитель с возбуждением от постоянных магнитов.

Конструкция генератора представлена на рис. 3. Генератор представляет собой трехмашинный агрегат с воздушным охлаждением внешним набегающим потоком воздуха и включает в себя основной генератор (3, 4), возбудитель (2, 5), блок вращающихся выпрямителей (12) и подвозбудитель (6, 11). Статоры всех трех машин размещены в едином корпусе (1). Роторы находятся на общем валу (7), установленном на двух подшипниковых опорах. Блок вращающихся выпрямителей (12) расположен на специальной ступице, входящей в состав ротора. Такая конструкция обеспечивает отсутствие скользящих электрических контактов и возможность регулирования выходного напряжения основного генератора с помощью блока управления генератором. За счет наличия подвозбудителя

обеспечивается независимое от внешних источников возбуждение генератора и питание блока управления.

Корпус (1) имеет цилиндрическую форму. В корпусе установлен пакет статора (3) с обмоткой якоря. Пакет набран из листов электротехнической стали. Выводные провода от обмотки статора основного генератора выведены в узел токоввода, в котором имеется возможность подключения генератора к бортовой сети. Присоединение генератора к воздушному венту осуществляется через фланец (8).

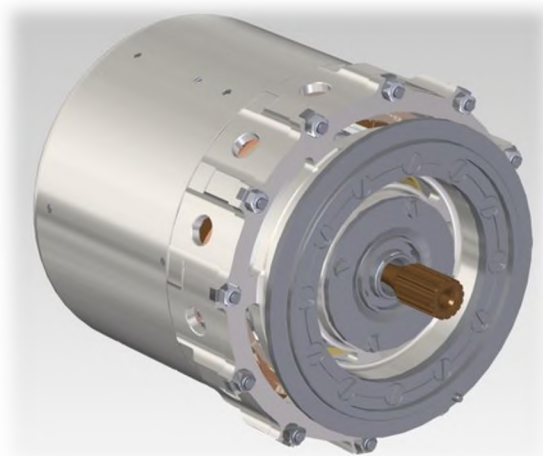


Рис. 1. Генератор аварийной установки самолета

Таблица 1. Типичные характеристики аварийного генератора

Напряжение переменного тока фазное /линейное, В	120/208
Номинальная мощность, кВ·А	10
Номинальный ток, А	42
Частота вращения, об/мин	от 8400 до 9200
Частота тока, Гц	400-460
Коэффициент мощности (cosφ)	не менее 0,8 (отстающий)
Режим работы	длительный, циклами до 10 часов

Индуктор основного генератора (4) выполнен явнополюсным. Пакет индуктора также набран из листов электротехнической стали. Для удержания лобовых частей используются держатели. Намотка производится единым проводом, без промежуточных соединений. Выводы обмотки возбуждения коммутируются на блок вращающихся выпрямителей.

Пакет возбудителя с якорной обмоткой (5) установлен валу ротора. Индуктор возбудителя установлен в том же корпусе, что и якорь основного генератора.

Подвозбудитель по типу электрической машины представляет собой синхронный генератор с постоянными магнитами на роторе. Конструкция статора (6) аналогична конструкции статора возбудителя. Ротор подвозбудителя (11) представляет собой постоянный магнит типа «звездочка».

Блок вращающихся выпрямителей (12) состоит из шести кремниевых диодов. Блок собран по двухполупериодной схеме выпрямления, обеспечивающий минимальную массу узла.

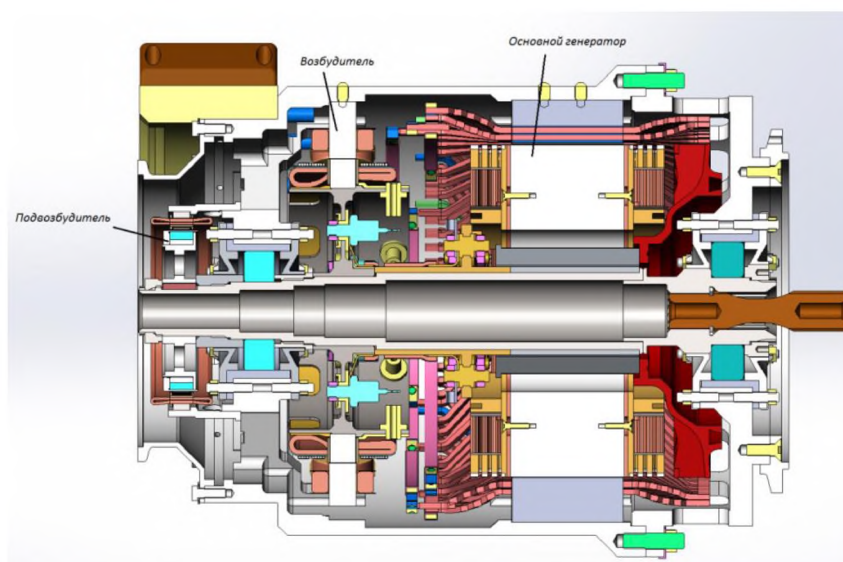


Рис. 2. Размещение агрегатов генератора внутри корпуса

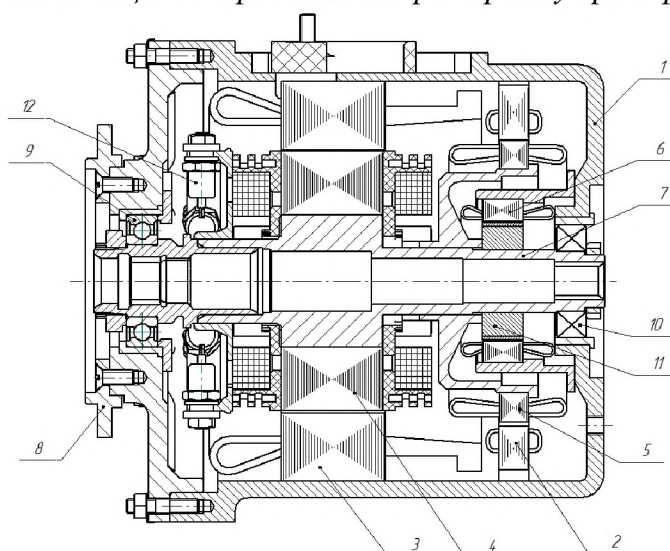


Рис. 3. Основные узлы генератора: 1 – корпус; 2 – статор возбудителя; 3 – статор основного генератора; 4 – ротор основного генератора; 5 – ротор возбудителя; 6 – статор подвозбудителя; 7 – вал; 8 – щит; 9 – передний подшипник; 10 – задний подшипник; 11 – ротор подвозбудителя; 12 – вращающийся выпрямитель

В генераторе установлены два радиальных шариковых подшипника. Подшипник в левой части (9) жестко закреплен в корпусе и на роторе. Он воспринимает как радиальную нагрузку, так и осевую (вес ротора). Другой подшипник (10) воспринимает только радиальную нагрузку. Он имеет возможность перемещения в корпусе с целью компенсации тепловых деформаций вала и корпуса.

Система охлаждения генератора – продув забортным воздухом. Для этой цели в корпусе (1) и фланце (8) имеются отверстия для прохода воздуха. Генератор работоспособен при температуре от минус 55°С до плюс 55°С.

Конструкция генератора включает в себя обмотку обогрева, питающуюся в убранным режиме от бортовой сети переменного напряжения 115 В.

Любая электрическая машина (двигатель или генератор) может быть отнесена к категории сложных систем, объединяющая в себе электромагнитные, электрические, волновые, тепловые, механические явления. Построение полной адекватной математической модели такого устройства – трудоемкая техническая задача ввиду высокой

многофакторности исследуемого объекта. Однако, проводимые ранее исследования показывают, что возникает целая система допущений, принятие которых приводит к положению о независимости уравнений, описывающих различные стороны процессов в электрических машинах [3].

Тем не менее, постоянное стремление к увеличению мощности агрегатов СЭС ведет к необходимости разработки новых устройств и, как следствие, к поиску новых методик, обеспечивающих как высокую точность, так и высокую скорость расчета характеристик проектируемых генераторов. Как уже упоминалось, одной из отличительных особенностей авиационных машин является их бесконтактность, обеспечиваемая комбинацией генератора и возбuditеля с блоком вращающихся выпрямителей в одном агрегате, что приводит к необходимости учитывать при разработках гальваническую связь отдельных компонентов трехмашинного агрегата и их взаимное влияние [2].

В настоящее время наиболее распространенными методиками расчета электрических машин, особенно массово производимых машин, являются табличная и формульно-аппроксимированная. В этих методиках зачастую используются наработки 20-30-летней давности, а процесс разработки сводится к подбору параметров электрической машины по таблицам. В зависимости от необходимых значений выходной мощности, габаритов, массы меняются количество полюсов, размеры, количество витков в обмотках и т.д. Конструкция же остается практически неизменной. Для того времени, когда мощной вычислительной техники просто не существовало, эти методики были вполне эффективны. Да и теперь не стоит полностью отказываться от них при проведении оценочных или прикидочных расчетов, но ограничиваться только ими – значит отставать от ведущих мировых разработчиков на те же 20-30 лет. Вариантом совершенствования методик расчета является применение метода конечных элементов для моделирования работы электрических машин. В качестве примера программных комплексов, основанных на современных конечно-элементных технологиях, можно назвать ANSYS, который сегодня успешно используется такими известными фирмами, как Siemens, Bosch, Motorola, General Electric, Intel и т.д. [5].

Постоянное стремление к повышению удельной мощности (снижению массы и габаритов) приводит к работе ЭМ в области насыщения. Поэтому расчетные методики прошлого века, основанные на грубых допущениях, в настоящее время становятся неактуальными. В то же время, точные полевые расчеты все еще требовательны к производительности вычислительной техники. Хорошим компромиссом является использование цепных методов расчета, основанных на специальных схемах замещения, которые обеспечивают высокую точность и скорость расчета магнитной цепи одновременно [3].

Метод зубцовых контуров (МЗК), позволяющий проводить быстрый расчет специальной эквивалентной схемы замещения магнитной цепи, обеспечивает точность полевого расчета, а также дает уравнения связи между переменными состояниями магнитной цепи и переменными состояниями электрической цепи [4]. Согласно МЗК, любую обмотку можно представить комбинацией зубцовых контуров, обеспечивающих правильное распределение МДС вдоль зазора и создающих результирующее поле в зазоре, аналогичное реальному.

Данный метод имеет ряд преимуществ:

- 1) Быстрый расчет схемы замещения при обеспечении той же точности расчета интегральных величин типа потокосцепления, что и при полевых методах;
- 2) Потребность в меньшем количестве вычислительных ресурсов;
- 3) Минимальная длительность расчетов;
- 4) Возможность быстрого расчета несколько вариантов конструкции, что актуально для задач оптимизации.

Для проведения расчетов записываются уравнения согласно формулам общего вида

- уравнения магнитной цепи:

$$A_m \bar{\Phi} = 0; \quad \bar{\Phi} = \Lambda (A_m^T \bar{\Phi}_m + \bar{F});$$

- уравнения электрической цепи

$$A_3 \bar{i} = 0; \quad \frac{d\bar{\Psi}}{dt} = \bar{u} + A_3^T \bar{\Phi}_3 - \bar{e}_{\text{ст}} - R \bar{i};$$

- уравнения движения:

$$J \frac{d\Omega}{dt} = M - M_c; \quad \frac{d\alpha}{dt} = \Omega;$$

- уравнения связи:

$$\bar{F} = W \bar{i}; \quad \bar{\Psi} = W^T \bar{\Phi}; \quad M = \frac{1}{2} \bar{\Phi}_3^T \left[\frac{d\Lambda}{d\alpha} \right] \bar{\Phi}_3.$$

Запись уравнений в таком виде позволят рассуждать о проектируемом объекте комплексно.

Применение такого метода расчета поможет в создании поверочной методики расчета, для проверки которой будут использоваться характеристики приведенной ранее электрической машины. В основе этого расчета будет лежать метод зубцовых контуров. Разрабатываемый программный комплекс необходим для быстрого получения внешних характеристик при различных режимах работы агрегата, при этом учитывающий компоновку генератора в виде основного каскада, возбuditеля и подвозбудителя.

Заключение

Основываясь на проведенных ранее исследованиях о необходимости увеличения мощности первичных источников электроэнергии, в статье рассмотрен один из способов проведения поверочного расчета электрических машин, основанный на методе зубцовых контуров. Для проверки адекватности создаваемых моделей принято решение об использовании готового авиационного электрогенератора в качестве объекта исследования. Реальная электрическая машина позволит уточнить необходимые параметры расчетных моделей, которые помимо насыщенных состояний ЭМ будут учитывать особенности гальванической связи входящих в трехмашинные агрегаты компонентов.

Список литературы

1. Дежин Д.С., Кондрашов Д.А., Коренчук К.Ю. Макет сверхпроводникового генератора для гибридной силовой установки. «Электрификация летательных аппаратов» /Сборник докладов. М.: ИД Академии Жуковского, 2016, 240 с.
2. Левин А.В., Мусин С.М., Харитонов С.А., Ковалев К.Л., Герасин А.А., Халютин С.П. Электрический самолет: концепция и технологии. Уфа: УГАТУ, 2014, 388 с.
3. Кузнецов В.А. Универсальный метод расчета магнитных полей и процессов электрических машин с дискретно распределенными обмотками. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. М.: МЭИ, 1990.
4. Ширинский С.В. Методы анализа электрических машин: учебное пособие. М.: Издательство МЭИ, 2017, 256 с.
5. Мякушев К. Современные методы расчета электрических машин [Электронный ресурс] /К. Мякушев. – Режим доступа: <http://www.https://sapr.ru/article/7241> (дата обращения: 22.03.2021).
6. Редкозубова, Ю. А. Возможности комбинирования методов поверхностного пластического деформирования деталей машин / Ю. А. Редкозубова, Л. А. Гик // Известия КГТУ. – 2009. – № 15. – С. 102-107.
7. Атабеков, К. К. Исследование влияния режимов движения на экологические показатели автомобилей / К. К. Атабеков // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. – 2014. – № 32-1. – С. 133-138.

Известия КГТУ им. И.Раззакова 58/2021

8. Акунов, Б. У. Проблемы экологии на автомобильном транспорте и пути их решения / Б. У. Акунов, Р. Т. Бопушев // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. – 2012. – № 26. – С. 146-150.