

19. Методология летных испытаний пилотажно-навигационного оборудования самолетов и вертолетов / Д.-Е.П. Новодворский, Г.И. Поярков, Е.Г. Харин и др.; Под ред. Д.-Е.П. Новодворского и Е.Г. Харина – М.: Машиностроение, 1984. – 136 с.

ИМИТАЦИОННОЕ КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЭЛЕКТРОТУРБОМАШИН ДЛЯ АВТОНОМНЫХ СИСТЕМ ГЕНЕРИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Понамарёва Л.Н., Румянцев М.Ю., Сизякин А.В.

Simulation computer modeling of high electric turbo machine autonomous system of power generation.
Ponamareva L.N., Rumyantsev M. Yu., Sizyakin A. V.

Введение

Энергосбережение и повышение эффективности использования энергетических ресурсов является в настоящее время важнейшими задачами, стоящими перед человечеством. Одним из путей решения этих задач является развитие малой и нетрадиционной энергетики, всё более широкое использование децентрализованных и автономных систем энергоснабжения (СЭС), в том числе малой (от единиц до сотен кВт) мощности. В Российской Федерации актуальность развития систем малой энергетики диктуется ещё дополнительным рядом причин:

- наличием огромного числа территорий, удалённых от централизованных сетей электропитания и/или не охваченных централизованным электроснабжением;
- необходимостью обеспечения надёжного электроснабжения потребителей в условиях участившихся в последние годы техногенных и климатических катастроф, при возникновении чрезвычайных ситуаций;
- наличием множества объектов, требующих для работы сравнительно небольших мощностей и удалённых от централизованных систем электропитания, таких как газоперекачивающие станции, системы катодной защиты нефте- и газопроводов, радиорелейные станции, буровые установки и т.д.;
- необходимостью обеспечения автономного и аварийного электроснабжения специальных объектов, обеспечивающих обороноспособность страны, в том числе в условиях возникновения террористической или военной угрозы;
- ограниченностью мощностей местных электросетей и постоянным повышением стоимости как подключения к сетям централизованного электроснабжения, так и пользования электроэнергией.

На сегодняшний день для систем малой энергетики одними из самых перспективных считаются СЭС на основе микротурбинных установок (МТУ), мощность которых в настоящее время ограничена на уровне 250 - 400 кВт.

1. Структура СЭС на основе микротурбинных установок

Основным функциональным элементом МТУ является газовая турбина, на одном валу с которой расположен ротор электрического генератора. Разработка МТУ активно началась во многих промышленно-развитых странах в 90-х годах прошлого века, мировыми лидерами по производству таких установок являются компании Capstone, Honeywell, Calnetix, и др. Преобразование тепловой энергии в электрическую в МТУ осуществляется в различных термодинамических циклах (Брайтона, Стирлинга, Ренкина, Эксона и др.). Источником теплоты в МТУ может служить теплота горения большинства промышленных (природный газ и попутный газы, дизельное топливо, бензин, керосин, уголь, торф), а также перспективных видов топлива (биодизель и биогаз, древесные гранулы и брикеты). Кроме того, в МТУ возможно эффективное преобразование низкопотенциальной тепловой энергии, например, солнечной и геотермальной, а также энергии, являющейся побочным продуктом технологических процессов (так называемое сбросное тепло). Расчёты специалистов показывают, что для преобразования энергии низкопотенциальных тепловых источников с возможным диапазоном температур от 60 до 180 °C наиболее экономичным является органический цикл Ренкина (Organic Rankine Cycle, ORC), в котором в качестве рабочего тела используются органические вещества, например, современные экологически безопасные фреоны. Функциональная схема микротурбинной энергоустановки, работающей по органическому циклу Ренкина, приведена на рис. 1.

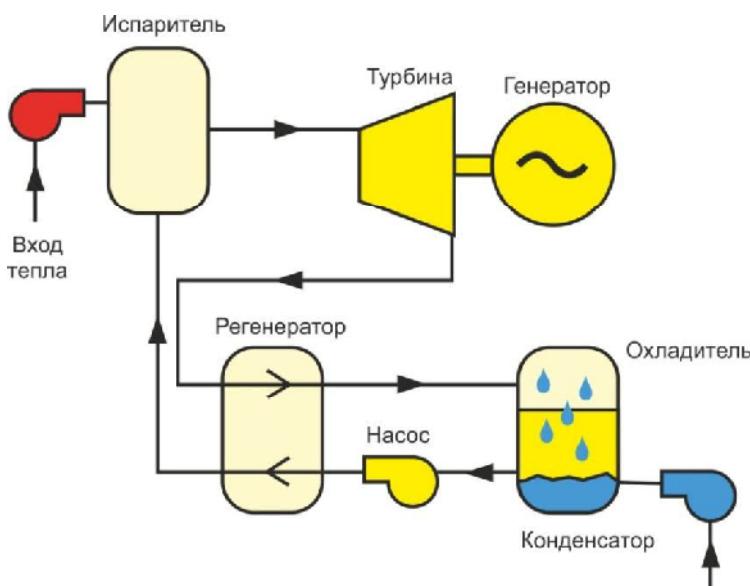


Рис. 1 Функциональная схема микротурбинной энергоустановки, работающей по ORC

1.1. Генератор

При относительно небольших мощностях МТУ, наибольшая эффективность преобразования энергии рабочего тела в механическую энергию вращения ротора достигается при использовании радиально-осевых центроостремительных турбин. При этом, как показывают расчёты специалистов, частота вращения таких маломощных турбин должна быть относительно высокой, исчисляемой десятками-сотнями тысяч об/мин.

Соответственно, электрический генератор МТУ, ротор которого располагается на общем валу с турбиной, также является высокоскоростным, что достижимо только в бесконтактных электрических машинах (ЭМ), среди которых наиболее распространены:

- асинхронные электрические машины;
- индукторные машины;
- ЭМ с возбуждением от постоянных магнитов (ПМ).

Для асинхронных ЭМ характерно потребление из сети реактивного тока и наличие значительного тепловыделения в роторе, что в конечном счёте приводит к недостаточно высокому КПД и сравнительно низким массо-габаритным показателям.

Индукторные ЭМ отличаются улучшенными массо-габаритными показателями, надежностью и простотой конструкции, низкой себестоимостью, хорошими регулировочными и динамическими характеристиками. Однако, в этих машинах, также как и в асинхронных, имеют место потери в роторе.

Машины с возбуждением от ПМ теоретически обладают наибольшей энергетической эффективностью по сравнению с остальными типами бесконтактных машин, практически не потребляют из сети реактивного тока ($\cos\phi \rightarrow 1$), отличаются простотой электрической схемы и высокой надежностью. Поэтому, как показывает практика, именно ЭМ с возбуждением от постоянных магнитов применяются в подавляющем большинстве МТУ ведущих мировых производителей.

1.2. Подшипники МТУ

Работоспособность работы микротурбинной установки во многом определяется выбором подшипников. Основные трудности этого выбора связаны с высокими скоростями вращения вала, с большими радиальными и осевыми нагрузками, с необходимостью работы в широком диапазоне температур при воздействии вибрационных и ударных нагрузок. Для высокоскоростных МТУ в подавляющем большинстве случаев применяются бесконтактные подшипники, так как на сегодняшний день даже самые совершенные подшипники качения с керамическими шариками имеют ограниченный ресурс работы, нуждаются в сложных системах смазки и охлаждения, требуют прецизионного монтажа и, в целом, являются достаточно дорогостоящим изделием. Среди бесконтактных подшипников на сегодняшний день наибольшее распространение получили магнитные газостатические и газодинамические подшипники. При этом опыт показывает, что для применения в МТУ наиболее целесообразно применять лепестковые газодинамические подшипники (ЛГДП), являющиеся разновидностью подшипников с газовой смазкой. Эти подшипники не нуждаются ни во внешнем источнике сжатого газа, необходимом для работы газостатических опор, ни в источнике электроэнергии, питающем электромагнитные опоры. Ресурс ЛГДП превышает 200000 часов и 100000 циклов «пуск/останов», частота вращения может доходить до 750 тысяч об/мин, а вес ротора может достигать 70 кг.

1.3. Электрическая часть установок

Величина и частота напряжения, вырабатываемого электротурбогенератором (ЭТГ), в процессе работы изменяются в зависимости от мощности нагрузки, давления и температуры рабочего тела и других факторов, тогда как выходное напряжение МТУ должно соответствовать стандартному напряжению общепромышленных сетей переменного тока: однофазного 220 В, 50 Гц при мощности энергоустановки до 10 кВт или трёхфазного 380/220 В, 50 Гц при мощности 10 ÷ 200 кВт с достаточно жёсткими требованиями к стабильности этих

значений и коэффициенту гармоник. Поэтому электрическая силовая часть МТУ, функциональная схема которой изображёна на рис. 2, выполняется по схеме со звеном постоянного тока. Выходное напряжение ЭТГ переменного тока высокой нестабильной частоты подаётся на вход электронного преобразователя ЭЛП1 (в простейшем случае неуправляемого мостового выпрямителя с фильтром на выходе). На выходе ЭЛП1 формируется напряжение U_d шины постоянного тока, к которой подключается электронный преобразователь ЭЛП2, основной функцией которого является формирование выходного синусоидального напряжения переменного тока заданного качества с частотой 50 Гц. Заметим, что такая структура СЭС позволяет осуществлять электрический запуск энергоустановки. В этом случае ЭЛП1 будет выполнять роль инвертора, передавая энергию от шины постоянного тока к электрической машине и обеспечивая работу ЭТГ в двигательном режиме. Соответственно, источником энергии в шине постоянного тока могут служить автономные источники, например, аккумуляторные батареи (на рис. 2 не показаны) или энергия может потребляться из сети переменного тока. В последнем случае преобразователь ЭЛП2 будет играть роль выпрямителя (активного или пассивного).

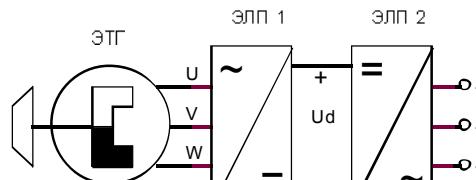


Рис. 2 Функциональная схема микротурбинной

2. Моделирование процессов ЭТМ

2.1. Постановка задачи

На первом этапе исследования рассматриваемой микротурбинной установки требовалось оценить работоспособность электрогенератора. Как известно, одним из способов исследования физических систем (особенно когда проведение экспериментов над реальной системой невозможно или нецелесообразно) является замена реального объекта на виртуальный посредством математических моделей. Именно при помощи имитационного компьютерного моделирования были проанализированы различные режимы работы МТУ и оценены ее параметры.

В качестве объекта исследования рассматривается электромеханическая система на базе синхронного электрогенератора на лепестковых газодинамических подшипниках с возбуждением от постоянных магнитов, входящая в состав установки для утилизации низкопотенциального тепла в органическом цикле Ренкина.

Параметры электрогенератора приведены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры электрогенератора

Параметр	Величина
Номинальная мощность P_2	1000 Вт
Номинальная частота вращения $n_{\text{ном}}$	100 тыс. об/мин
Частота всплытия опор $n_{\text{вспл}}$	12 тыс. об/мин
Число полюсов $2p$	2
Число фаз m	3
Схема соединения фаз	звезда
Сопротивление фазы R_f	0,28 Ом
Индуктивность фазы L_f	360 мГн
Рабочее тело	Фреон

2.2. Моделирование магнитного поля в электрогенераторе

На первом этапе исследования проводилось моделирование магнитного поля в электрогенераторе. В настоящее время существует множество вычислительных пакетов, позволяющих моделировать магнитные поля. Подавляющее большинство этих пакетов используют метод конечных элементов для расчёта индукций и напряжённостей в каждой точке пространства. В качестве основного пакета для моделирования был выбран пакет прикладных программ COMSOL, исходными данными являлись геометрические и обмоточные данные ЭТГ, характеристики материалов постоянного магнита и участков магнитопровода, а также параметры исследуемого режима работы.

В результате проведённого моделирования получены картины распределения магнитного поля в ЭТГ для различных режимах его работы, а также осцилограммы линейных и фазовых напряжений и токов. Распределение индукции магнитного поля вдоль расточки якоря приведено на рис. 7, а на рис. 8 – пространственное распределение магнитного поля в зазоре ЭТГ. Видно, что распределение индукции является синусоидальным, с проявлением зубцовых гармоник.

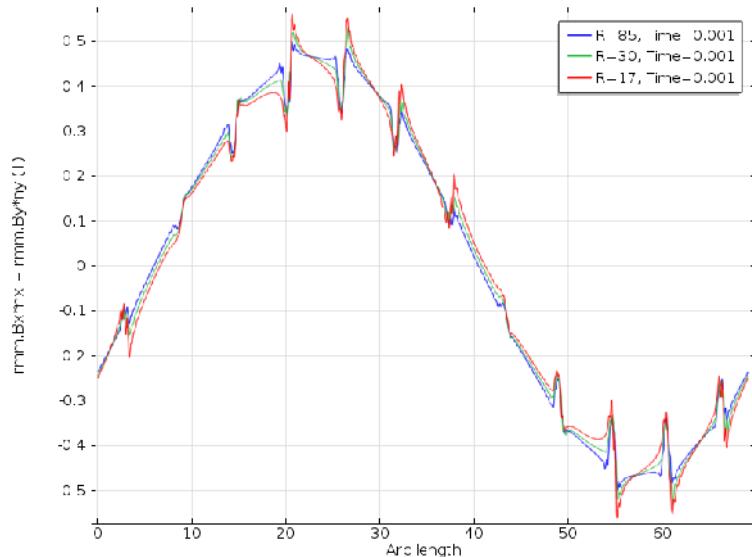


Рис. 7 Распределение индукции вдоль расточки якоря при различных сопротивлениях нагрузки генератора

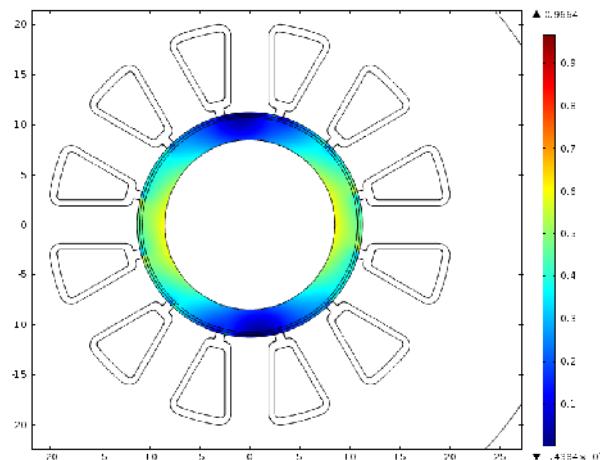


Рис. 8 Двухмерная картина распределения магнитного поля

На следующем этапе исследования определялись электромагнитные параметры ЭТГ при подключении нагрузки. Для этого разработанная модель была расширена электрической схемой, имитирующей нагрузку. Для сокращения времени расчётов нагрузка была задана симметричной трёхфазной, подключенной непосредственно к выводам фазных проводов ЭТГ. На рис. 9 приведены кривые фазных напряжений, а на рис. 10 фазных токов для различных значений сопротивления нагрузки. Моделирование проводилось для номинального режима, режима перегрузки (примерно в 2,8 раза) и режима, соответствующего примерно 60% номинальной мощности. По рис. 9 видно, что при изменении нагрузки выходное напряжение ЭТГ изменяется несущественно, а именно, при изменении мощности нагрузки в 5 раз амплитуда фазного напряжения изменяется лишь на 6%. Полученный результат позволил сделать вывод о том, что при работе ЭГ постоянный магнит практически не изменяет своего состояния, что характерно для цилиндрической конструкции ротора. Полученные результаты моделирования позволили ввести допущение о том, что вне зависимости от режима работы потокосцепление в ЭГ не изменяется. Для номинального режима в COMSOL было рассчитано значение потокосцепления $\Psi = 13,85$ мВб.

Таким образом, с помощью пакета COMSOL были определены основные характеристики магнитного поля, проведена проверка ЭГ на устойчивость к перегрузкам и определено значение потокосцепления, которое использовалось в дальнейших расчётах.

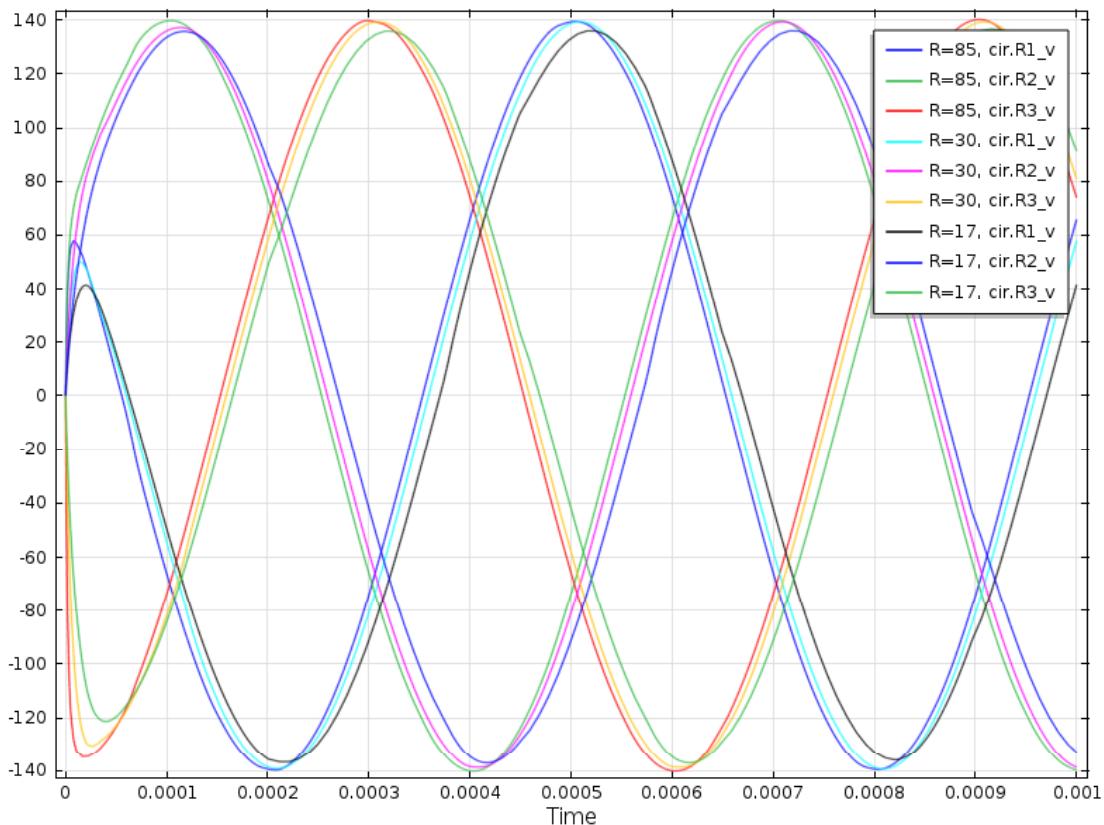


Рис. 9 Фазные напряжения

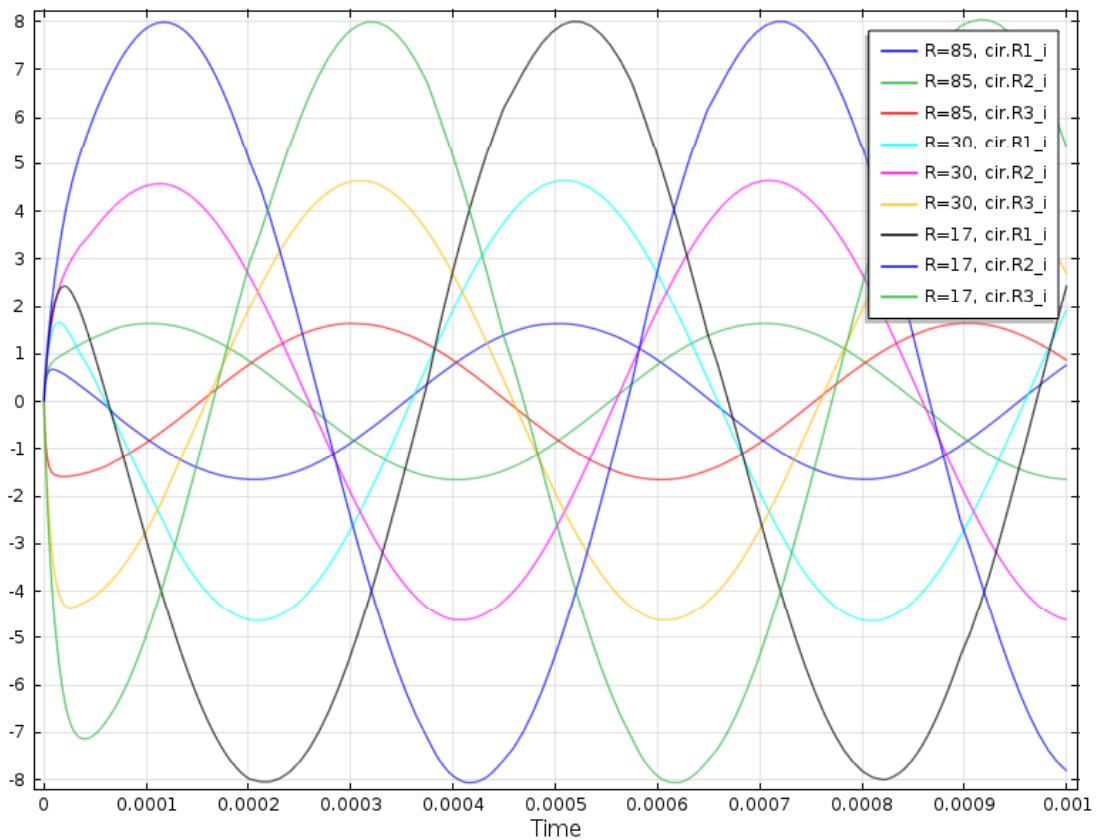


Рис. 10 Фазные токи

2.3. Моделирование ЭТМ при работе на нагрузку в генераторном режиме

Анализ процессов, происходящих в ЭТМ посредством программы COMSOL дал хорошие результаты, но потребовал больших затрат машинного времени. Для анализа большинства режимов работы ЭТМ не требуется доскональное исследование распределения магнитного поля в пространстве. Так же результаты, моделирования

в программе COMSOL показали малое изменение поля машины при работе на различные нагрузки. Поэтому было принято решение ввести допущение о неизменности картины поля в машине в процессе работы. Помимо этого было решено распределение магнитного поля считать синусоидальным. Это позволило подойти к анализу ЭГ с позиции обобщённой электрической машины. Дальнейшие исследования работы ЭГ проводились с помощью программы Matlab (пакет Simulink).

Рассматриваемый ЭТГ представляет собой систему, состоящую из нескольких блоков: электрической машины, преобразователя (выпрямителя) и нагрузки.

Уравнение, описывающее электрические процессы в обмотке фазы А статора в модели ЭТГ, имеет вид:

$$u_{as} = i_{as} r_{as} + \frac{d\Psi_{as}}{dt}, \text{ где } \frac{d\Psi_{as}}{dt} = L_{as} \frac{di_{as}}{dt} - 0.5M \frac{di_{bs}}{dt} - 0.5M \frac{di_{cs}}{dt}.$$

Схема замещения обмотки представлена на рис. 11:

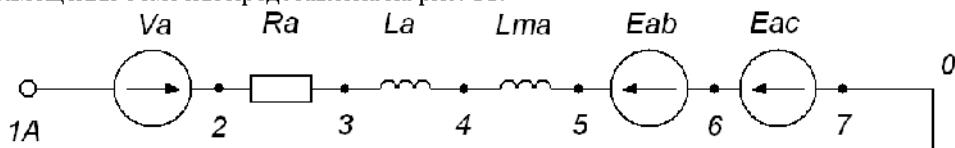


Рис. 11 Схема замещения обмотки

Система уравнений, описывающая электромагнитные процессы в ЭТГ, реализована с помощью силовых элементов библиотеки SimPower Systems и визуальных блоков пакета Simulink.

Схема такой модели блока ЭМ представлена на рис. 12.

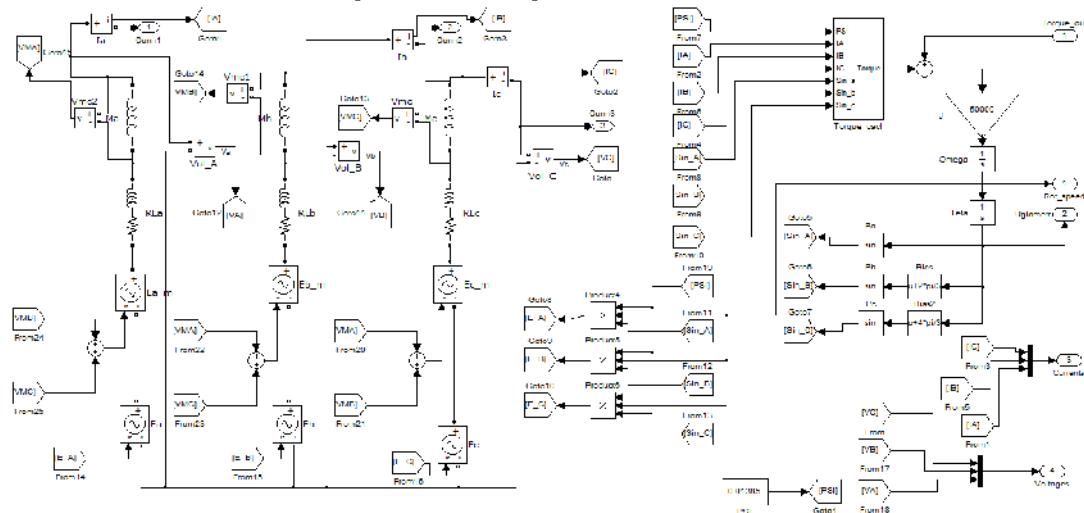


Рис. 12 Схема модели электрической машины

Обмотки машины представлены в виде электрической цепи, состоящей из активных сопротивлений, собственных индуктивностей каждой фазы и взаимных индуктивностей фаз. В состав электрической цепи также входят ЭДС, формируемая в фазе рабочим потоком ЭМ и ЭДС взаимоиндукции.

Уравнения, описывающие значения фазных ЭДС $e_i = \Psi \cdot \omega \cdot \sin(\omega t + \varphi)$, реализованы

следующим образом: сигналы с блоков PSI (имитирует величину потокосцепления), Sin, и Integrator (блок скорости вращения) подаются на вход блока операции умножения Product. На выходе этого блока формируется сигнал, равный мгновенному значению ЭДС соответствующей фазы. Этот сигнал подаётся на вход управляемого источника напряжения, формирующего ЭДС в электрической цепи фазы.

При протекании фазного тока через индуктивное сопротивление M (M_a для фазы А, M_b для фазы В и M_c для фазы С) на нём формируется падение напряжения, равное $\Delta U_M = M \frac{di_\Phi}{dt}$. ЭДС взаимоиндукции фазы задаётся в модели как сумма падений напряжений на индуктивных сопротивлениях M двух других фаз. Измерение этих падений напряжений выполняется с помощью блока вольтметра Voltage Measurement. Полученные величины ЭДС взаимоиндукции, также как и в случае вычисления фазного ЭДС подаются на вход управляемых источников напряжения E_{am} , E_{bm} и E_{cm} .

Модель механической подсистемы представлена на рис. 13. В ней реализованы уравнение вычисления электромагнитного момента ЭМ:

$M_{\text{ем}} = \frac{3}{2} p \cdot \sum \Psi_{ik} \cdot i_{ki}$ (блок Torque_calc) и уравнение движения $M_{\text{ем}} = \frac{3}{2} p \cdot \sum \Psi_{ik} \cdot i_{ki}$

$$J \frac{d\Omega}{dt} \pm M_c = M_{\text{ем}}$$

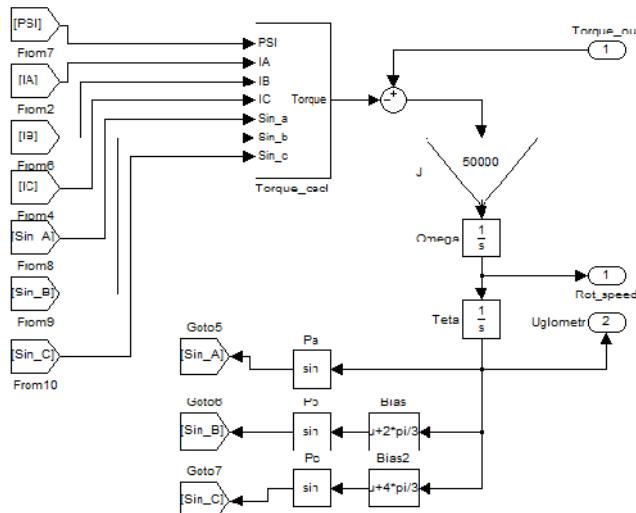


Рис. 13 Модель механической подсистемы

Структурная схема блока Torque_calc, приведена на рис. 14. Входными данными для вычисления электромагнитного момента являются значения потокосцепления, синуса, а также сигналы с датчиков измерения тока Current Measurement в цепях обмоток статора. В блоках Product, Product1 и Product2 осуществляется вычисление проекции вектора тока каждой фазы на поперечную ось ЭМ. Далее, эти проекции складываются в блоке суммирования. С помощью блока Product3 осуществляется вычисление произведения двух величин: суммарного тока по поперечной оси и потокосцепления ЭМ, таким образом, на выходе этого блока формируется сигнал, равный электромагнитному моменту ЭМ.

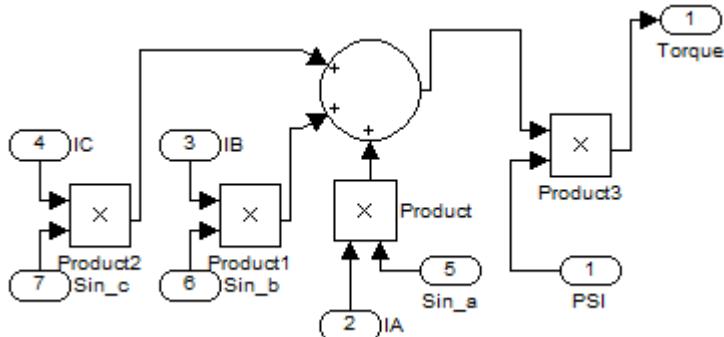


Рис. 14 Блок-схема алгоритма вычисления электромагнитного момента

Угловое положение ротора является величиной, формируемой интегрированием частоты вращения ротора, которая в свою очередь также является интегральной величиной от разницы моментов относительно момента инерции.

Моделирование генераторного режима работы машины осуществляется посредством имитации подключения к ней блоков электрической нагрузки и выпрямителя, а также блока, формирующего внешний вращающий момент. Структурная схема такой системы приведена на рис. 15.

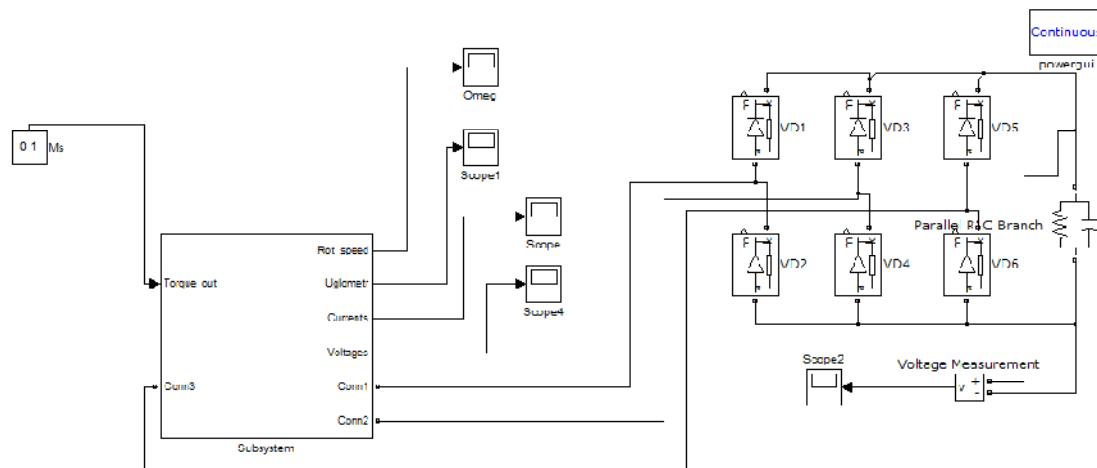


Рис. 15 Структурная схема генераторного режима работы ЭТМ

В момент времени $t=0$ на вход блока электрической машины подается постоянный вращающий момент величиной $0.1 \text{ Н}\cdot\text{м}$, представленный блоком M_s . Для сокращения времени расчёта в блоке интегратора Ω_{int} (рис. 12) задано значение начальной скорости, близкое к скорости установившегося режима. Возможность изменять начальную частоту вращения ротора генератора позволяет исследовать на модели рабочий режим, не затрачивая времени на расчёт режима запуска, который требует значительных затрат машинного времени.

Осциллографы Omega , Scope , Scope1 и Scope4 отображают величины фазных напряжений и токов, а также скорость вращения ротора ЭМ и угол положения ротора в пространстве.

Результаты моделирования приведены на рис. 16, 17.

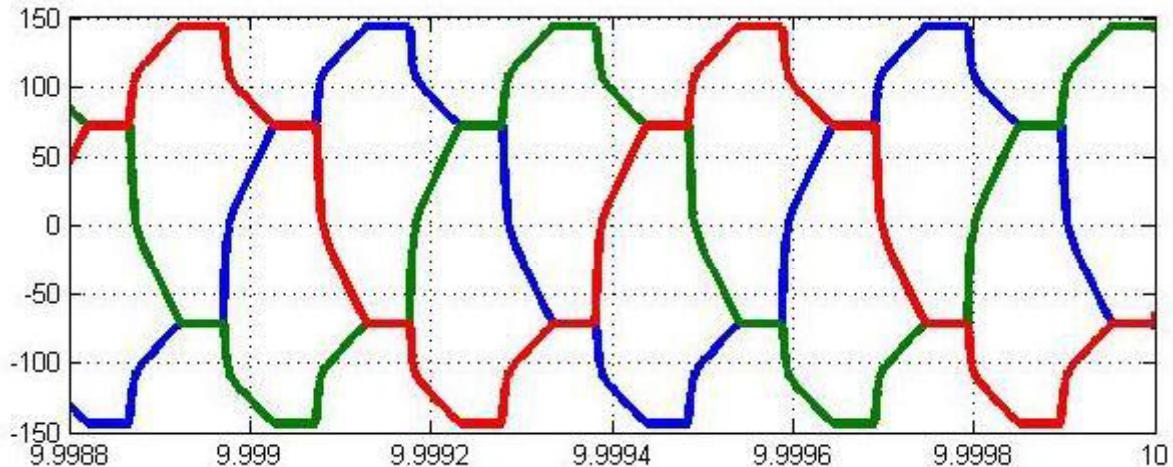


Рис. 16 Фазные напряжения генератора в номинальном режиме работы.

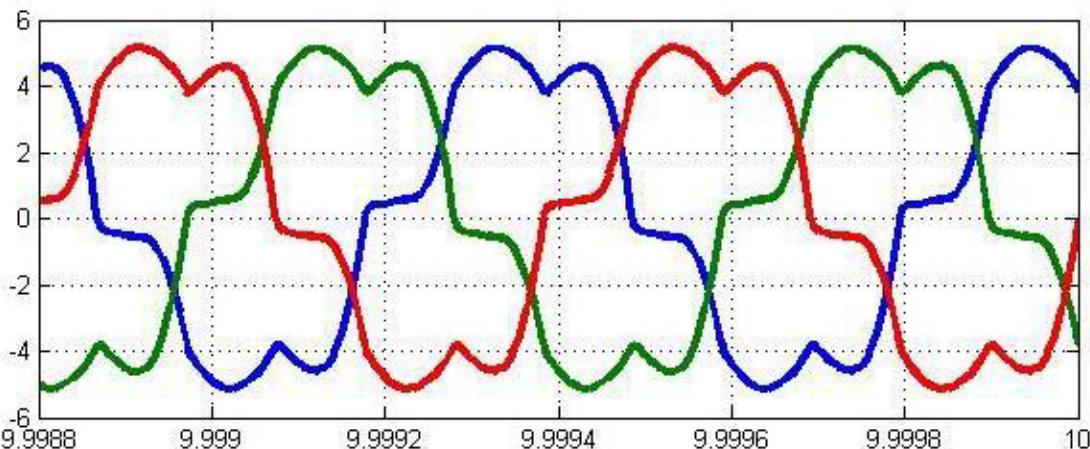


Рис. 17. Фазные токи в номинальном режиме работы.

2.4. Эксперимент

На основе ТЗ и рассчитанных данных на кафедре электротехнических комплексов автономных объектов (ЭКАО) НИУ МЭИ был разработан и изготовлен опытный образец электротурбогенератора ЭТГ-1, фото и

трехмерный эскиз которого приведены на рис. 18. Проверка работоспособности турбогенератора была проведена уже на реальном образце.

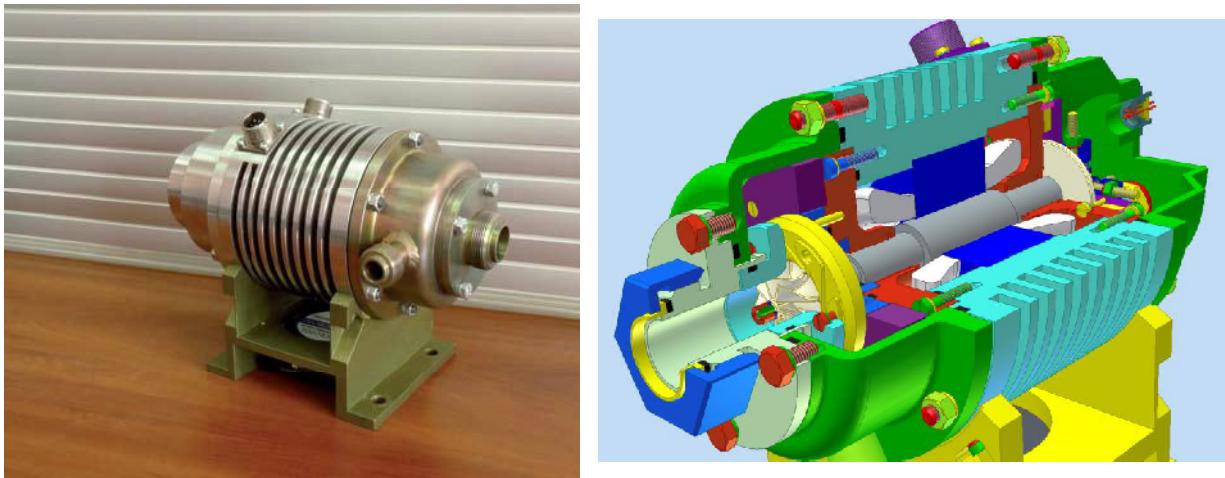


Рис. 18 Вид ЭТГ-1

Для этого специалистами в НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова был изготовлен стенд, на котором с помощью сжатого воздуха приводится во вращение ротор турбогенератора и осуществляются различные режимы его нагрузки. Схема электрической части стенда приведена на рис. 19.

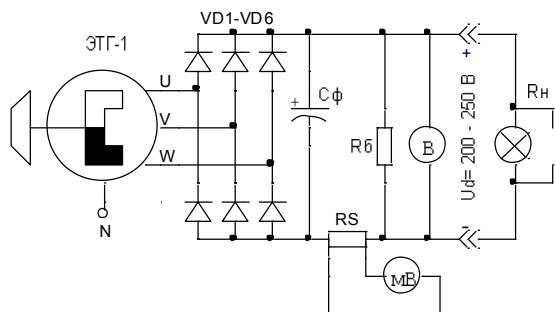


Рис. 19 Схема электрической части экспериментальной установки

Выходы U, V, W, фаз турбогенератора ЭТГ-1 подключаются к входу трёхфазного мостового неуправляемого выпрямителя, собранного на высокочастотных выпрямительных диодах.

C_ϕ - фильтр.

Резистор R_b выполняет роль балластной нагрузки, которая позволяет избежать разрушения на холостом ходу при наличии давления на входе в турбину.

Вольтметр «B» используется для измерения напряжение U_d на шинах постоянного тока,

С помощью милливольтметра «мВ» измеряется величина тока нагрузки по падению напряжения на шунте RS.

Резистор R_h представляет собой ряд ламп накаливания мощностью 200 и 300 Вт, используемых в качестве внешней нагрузки. Лампы подключались с помощью тумблеров, имитировалось четыре дискретных уровня внешней нагрузки. На рис. 22 приведена фотография процесса испытаний турбогенератора на воздушном стенде при максимальной подключённой нагрузке.

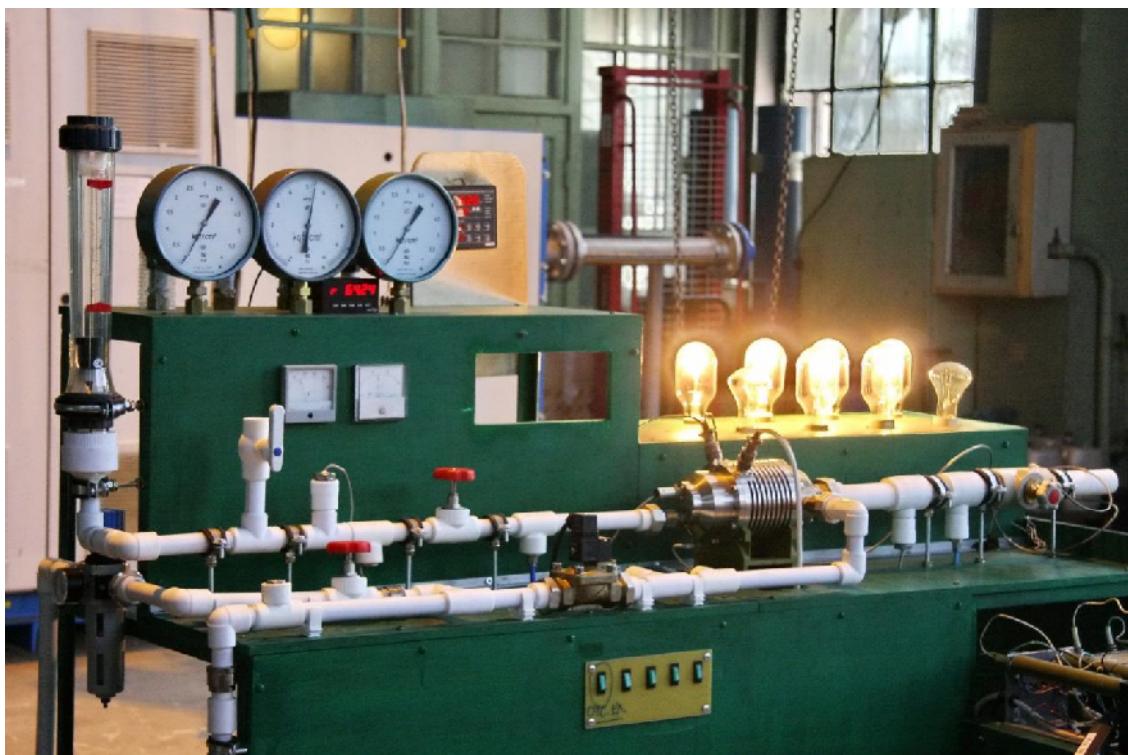


Рис. 20 Испытания ЭТГ-1 на воздушном стенде

Испытания установки проводились при частотах вращения ротора $n=60, 90$ и 100 тыс. об/мин. При этом частота вращения поддерживалась на постоянном уровне ($\pm 10\%$ от заданного) при переменной нагрузке. Стабилизация осуществлялась с помощью ручного регулирования давления и расхода воздуха.

Экспериментально полученные осциллограммы фазных токов и напряжений ЭТГ приведены на рис. 21.

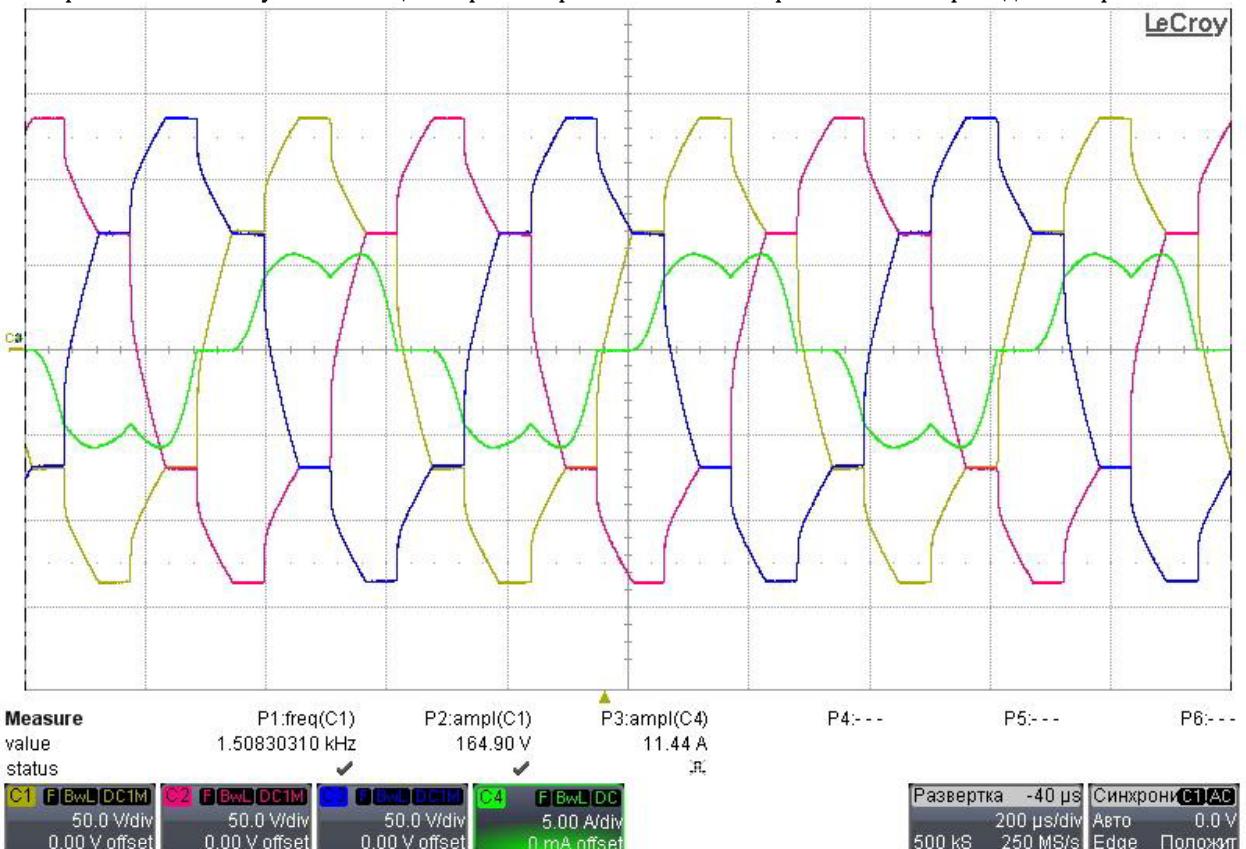


Рис. 21. Осциллограммы фазных напряжений и одного фазного тока при экспериментальном исследовании.

Сопоставление результатов моделирования и экспериментальных исследований (см. рис. 16 и 17 и 21) показали их несущественное различие, что позволяет судить об адекватности разработанной модели.

В результате экспериментального исследования также были получены внешние характеристики турбогенератора, которые приведены на рис. 22.

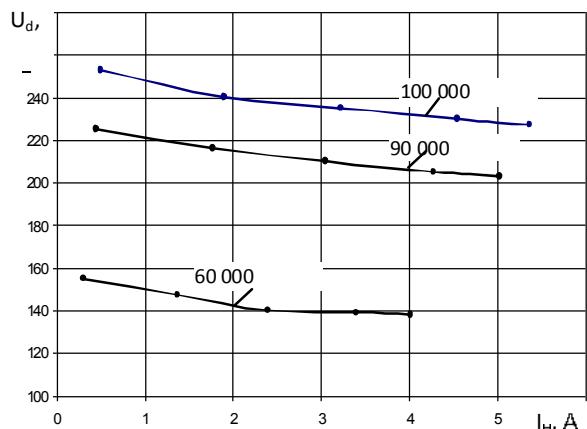


Рис. 22 Внешние характеристики генератора

Заключение

В докладе рассмотрена энергетическая установка для преобразования низкопотенциального тепла в электрическую энергию. Рассмотрены типовые структуры микротурбинных установок, приведены обоснования для выбора наиболее оптимальной структуры. Рассмотрены различные варианты исполнения электрических машин для микротурбинных установок, обоснована перспективность применения электрических машин с постоянными магнитами. Рассмотрены подходы к созданию модели электрической машины с постоянными магнитами, и разработаны две различные модели. С помощью разработанных моделей проведены расчёты, которые дали результаты, близкие к результатам экспериментального исследования. Таким образом, рассмотренные в докладе модели подтвердили свою адекватность и могут быть использованы для дальнейших исследований ЭТГ, в частности для исследования режима запуска, для которого экспериментальное исследование затруднено, ввиду невозможности осуществления частых запусков машин с ЛГП.

В дальнейшем планируется расширить и дополнить разработанную модель блоком турбины для исследования работы всей системы электроснабжения в целом.

ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРОИЗВОДСТВА КОЛЬЦЕВЫХ ЛАЗЕРОВ

Новиков С.С., Потапова Т.А., Савельев И.И., Хлебников П.А.
МИЭМ НИУ ВШЭ, Москва МФТИ

Рассмотрены этапы проектирования единой информационной системы поддержки производства лазеров, в итоге, разработана ее модель сущность–связь с использованием CALS – и CASE – технологий.

Information system support in ring laser productions. Novikov S., Potapova T., Sevel'ev I., Khlebnikov P.

Issues on the stages of designing a unified information system support of the laser productions, in turn, a new entity-relationship model is developed, using CALS – and CASE – technologies.

Производство кольцевых лазеров – наукоёмкий процесс, основанный на современных технологиях. Его производительность и устойчивость в большей степени зависит от организации информационной системы поддержки этого процесса.

Актуальной задачей сегодня является переход от распределенных хранилищ данных к единой информационной системе.

В настоящей работе на основе анализа технологического процесса производства кольцевых лазеров – датчиков лазерных пироскопов с использованием CALS – и CASE – технологий разработана модель сущность–связь единой информационной поддержки производства лазеров.

В ходе концептуального проектирования определены типы сущностей и связей, атрибуты и их домены, потенциальные и первичные ключи. Проведена проверка модели на отсутствие избыточности и соответствие конкретным пользовательским транзакциям.

На этапе логического проектирования исключены особенности, несовместимые с реляционной моделью, определен набор отношений, проведена проверка отношений с помощью правил нормализации и соответствия