

ния ГТД стал устойчивым и приобрёл высокое быстродействие.

На основании данных по испытанным системам и анализа возможных схем предлагается классификация САР ГТД, состоящая из четырех групп. С увеличением номера группы допустимое запаздывание в ТО может возрастать.

**1. Одноконтурные САР с регулированием расхода сжиженного топлива (НК-361 с ЦН)** приемлемы при малом запаздывании в ТО. Единственный способ повышения качества - введение производных в закон регулирования.

**2. Двухконтурные каскадные системы с регулированием частоты вращения ЦН и управляемым дросселем ДР (НК-88 и НК-89).** Внутренний контур обеспечивает частичную компенсацию запаздывания в ТО. Схема с регулятором расхода вместо ДК при сохранении форсирующих свойств по динамике аналогична.

### 3. Многоконтурные системы с одновременным регулированием расходов сжиженного топлива, газа и частоты вращения ЦН.

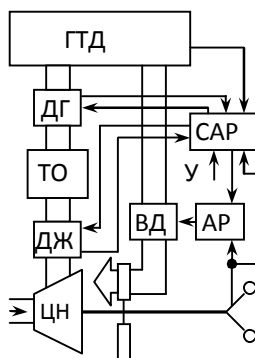


Рис. 4 Схема многоконтурной САР

Такие многомерные системы с перекрёстными связями должны обладать большими возможностями улучшения динамики.

**4. САР с двумя независимыми контурами:** контуром регулирования давления газифицированного топлива в ресивере и контуром регулирования параметров ГТД газовым дозатором (НК-361 на ГТ1-001). В этой системе отсутствует влияние запаздывания в ТО на контур регулирования ГТД.

УДК 621.45.00.11.018.3

## СТРУКТУРНАЯ И ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОТРАБОТКА ТОПЛИВНОЙ СИСТЕМЫ МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОТУРБОВОЗА С КРИОГЕННЫМ ПОРШНЕВЫМ НАСОСОМ СПГ И РЕСИВЕРОМ ГАЗА

Букин В.А.<sup>1</sup>, Руденко В.Ф.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ОАО "КУЗНЕЦОВ", г. Самара

<sup>2</sup>ОАО "ВНИКТИ", г. Коломна, Московской обл.

### DEVELOPMENT OF ELEMENTS AND PARAMETERS OF LNG FUEL SYSTEM WITH CRYOGENIC PISTON PUMP AND GAS RECEIVER FOR ROAD GAS TURBINE LOCOMOTIVE

*Bukin V.A., Rudenko V.F. The report represents gas turbine locomotive LNG fuel system development results.*

В декабре 2010 г. - январе 2011 г. проведены ходовые испытания магистрального газотурбовоза ГТ1-001 мощностью 7500 кВт с газотурбинным двигателем (ГТД) НК-361 на сжиженном природном газе (СПГ). С грузовыми составами весом до 12300 тонн под тягой газотурбовоза пройдено на Московской и Горьковской ж.д. более 5000 км.

На газотурбовозе применена топливная система с криогенным поршневым насосом (ПН), установленным за турбиной дви-

гателя топливогазовым теплообменником (ТГТ), ресивером газа (РГ), газовым дозатором (ДГ) системы регулирования и отсечным клапаном (ОК). В системе использован хладоресурс СПГ для охлаждения масла двигателя и генераторов в двух топливомасляных теплообменниках (ТМТ).

Настоящая топливная система является модернизацией предыдущей системы, в которой дозатор топлива был установлен в жидкостной линии за центробежным насо-

сом. От такой схемы пришлось отказаться ввиду невозможности получить устойчивую работу системы регулирования из-за запаздывания в теплообменниках и длительного времени захлаживания центробежного насоса перед запуском.

Схема с ресивером и газовым дозатором позволяет вывести из контура регулирования ГТД теплообменники, сняв проблемы по устойчивости и быстродействию, а поршневой насос требует значительно меньше времени для захлаживания.

Для решения комплекса задач по обеспечению работоспособности модернизированной системы и условий работы НК-361 во время её отработки выполнена коррекция структуры и параметров, а для работы в автоматическом режиме разработаны и реализованы алгоритмы управления.

Отработка топливной системы выполнена на реостатных испытаниях в ОАО "ВНИКТИ" осенью 2011 г.

На рис. 1 приведена структурная схема топливной системы. На схеме не показаны вентили, клапаны захлаживания насоса, дренажа и заполнения РГ из «подушки» криогенной ёмкости, а также устройства, являющиеся типовыми для подобных систем.

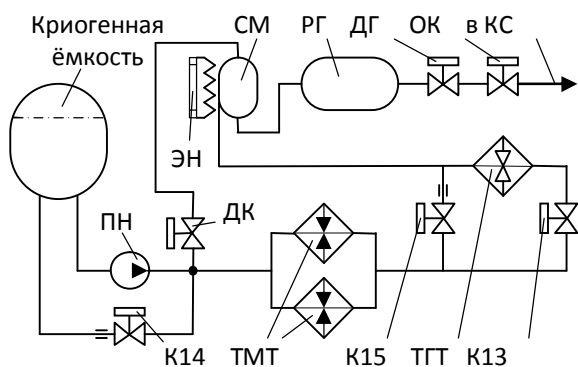


Рис. 1. Структурная схема топливной системы

С целью газификации СПГ во время заполнения ресивера до подачи топлива в камеру сгорания (КС) двигателя используется смеситель (СМ) с электронагревателем (ЭН). Обогрев смесителя включается при подготовке к запуску и отключается после запуска двигателя. Перед запуском через дроссельный кран (ДК) к смесителю подается СПГ. После подачи газа в камеру сгорания двигателя ДК закрывается и весь СПГ проходит через ТМТ, чем обеспечивается

эффективное охлаждение масла. До окончания запуска газ, поступающий из основного ТГТ в ресивер, дополнительно подогревается в смесителе.

Между выходом из ТМТ и входом в ТГТ установлен клапан К13, препятствующий замораживанию масла в ТМТ во время предварительного заполнения ресивера. Клапан К13 открывается на запуске перед подачей топлива в двигатель.

Для ограничения максимальной температуры газифицированного СПГ по условиям эксплуатации ДГ параллельно ТГТ и К13 установлен клапан К15 с дросселем. Клапан К15 открыт на низких режимах, когда температура газа за ТГТ без перепуска может превышать  $120^{\circ}\text{C}$ , допустимую для ДГ. Для исключения замораживания масла в ТМТ при запуске К15 открывается одновременно с К13.

Ввиду того, что допустимый минимальный расход насоса больше требуемого минимального расхода двигателя, с выхода насоса выполнен перепуск в криогенную ёмкость через клапан К14 и дроссель. На холостом ходу (ХХ) и низких режимах К14 открыт.

Процесс подготовки к запуску начинается с подачи газа из «подушки» криогенной ёмкости в ресивер и захлаживания насоса. После выравнивания давления в криогенной ёмкости и ресивере ( $0,35...0,45$  МПа) при открытом К14 криогенный насос выводится на минимальную частоту вращения. После достижения давления в ресивере 1,2 МПа насос останавливается и включается стартер двигателя. При раскрутке роторов двигателя давление в ресивере продолжает увеличиваться за счет газификации СПГ в смесителе.

Перед подачей топлива в камеру сгорания двигателя насос повторно включается, а для быстрого заполнения ресивера во время увеличения расхода топлива на запуске двигателя перепуск насоса клапаном К14 закрывается. После достижения давления в ресивере 2 МПа К14 открывается и вступает в работу регулятор давления в ресивере. Процесс запуска от захлаживания насоса, заполнения ресивера, до выхода на режим ХХ не превышает 8 минут.

Давление в ресивере поддерживается изменением частоты вращения криогенного насоса. Для оптимального открытия ДГ настройка регулятора плавно повышается с 2 МПа на XX до 3 МПа на максимальной мощности. Ввиду того, что при регулировании расхода учитывается изменение давления и температуры перед ДГ, к регулятору давления не предъявляется жестких требований. Колебания давления в ресивере не отражаются на работе системы регулирования двигателя.

Перед остановкой во время охлаждения двигателя на режиме XX криогенный насос переводится на минимальную частоту вращения с целью снижения давления в ресивере до 0,5...0,8 МПа. Такой алгоритм остановки минимизирует количество газа в ресивере при неработающем двигателе.

Запас газа в ресивере, тепловая инерционность ТМТ и маслосистем делает возможным работу двигателя и охлаждение масла некоторое время при отказе криогенного топливного насоса. В такой нештатной ситуации перевод двигателя на режим XX, его охлаждение и останов не сопровождается опасным повышением температур масла в ГТД и генераторе.

#### **Выводы:**

1 Выполнена коррекция структурной схемы топливной системы газотурбовоза и её параметрическая отработка.

2 Процесс запуска от захлаживания насоса, заполнения ресивера, до выхода на режим холостого хода не превышает 8 минут.

3 Влияние запаздывания теплообменников на работу системы регулирования ГТД отсутствует.

УДК 621.3.002.3(076.5)

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫГОРАНИЯ ТОПЛИВА В ВИХРЕВОМ ГАЗОВОМ ГОРЕЛОЧНОМ МОДУЛЕ**

Гурьянов А.И., Евдокимов О.А.

Рыбинская государственная авиационная технологическая академия имени П.А. Соловьёва

### **EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF THE COMBUSTION PROCESS IN VORTEX GAS BURNER**

*Guryanov A.I., Yevdokimov O.A. It is presented the results of numerical and analytical calculations of the combustion efficiency in the tubular combustion chamber with gas ejection burner and its experimental confirmation. It is performed a comparison of these results and made guidelines about the secondary air's discharging into the flame tube.*

Одной из основных характеристик камер сгорания двигателей является полнота сгорания топлива, определяющая степень завершенности процесса преобразования энергии химических связей в теплоту. Помимо этого, полнота сгорания является количественной мерой присутствия в продуктах сгорания промежуточных компонентов реакций и непрореагировавших углеводородов. Её оценка неразрывно связана с проблемой соответствия процесса горения жестким требованиям по эмиссии загрязняющих веществ. Это определяет актуальность ис-

следований, направленных на создание полуэмпирических методик оценки изменения полноты сгорания по длине КС. Попытки создания таких расчётных зависимостей предпринимались различными авторами, однако неизменно сводились к необходимости введения различных эмпирических коэффициентов, применимых для геометрически подобных камер. Отмеченное требует обобщения многочисленного экспериментального материала с единых позиций и тестирования полуэмпирических методов расчёта на модельных задачах выгорания топлива в