

сти оптических переходов между электронно-колебательно-вращательными энергетическими уровнями молекулы. Для их расчета требуется вычисление интегралов перекрытия волновых функций верхнего и нижнего состояния электронных уровней – факторов Франка-Кондона. В разрабатываемой методике расчёта используются волновые функции для нескольких электронных состояний атома водорода. Каждая из них представляется произведением радиальной и угловой составляющей. В работе построены графики для радиальных составляющих волновых функций. Они достаточно хорошо совпадают с имеющимися литературными данными.

Для разрешённых переходов построены графики перекрытия волновых функций и вычислены факторы Франка-Кондона. Проведено исследование влияния параметров и коэффициентов модели на получаемые значения факторов Франка-Кондона и форму орбиталей электрона. Следующим шагом планируется произвести расчет спектра интенсивности флуоресценции.

Разрабатываемые математические модели будут использоваться в НОЦ газодинамических исследований СГАУ для расшифровки измеренных CARS - и LIF-спектров при диагностике пламени в камерах сгорания тепловых двигателей.

УДК 621.45.00.11.018.3

## **МЕТОДЫ ИНЖЕНЕРНОГО СИНТЕЗА САР ГТД, РАБОТАЮЩИХ НА КРИОГЕННОМ ТОПЛИВЕ**

Букин В.А.

ОАО «КУЗНЕЦОВ», г. Самара

### **ON SELECTION OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEM FOR CRVOGENIC FUEL GAS TURBINE ENGINE**

*Bukin V.A. The report deals with selection of ACS configuration on the base of time lag value during cryogenic fuel gasification.*

В газотурбинных двигателях (ГТД), работающих на криогенным топливе - сжиженном водороде (СВ) или сжиженном природном газе (СПГ), его газификация производится в установленном за турбиной теплообменнике (ТО). Особенность систем автоматического регулирования (САР) таких ГТД - отрицательное влияние запаздывания в ТО на их устойчивость и быстродействие.

Инженерный синтез заключается в таком построении САР, при котором обеспечивается выполнение технических требований к ней. Основная задача синтеза САР ГТД на криогенном топливе - компенсация влияния запаздывания в ТО. Анализ вариантов системы, обоснование структуры, методов коррекции, разработка корректирующих устройств, динамические исследования являются составляющими инженерного син-

теза. При этом синтез должен базироваться на возможности технического воплощения.

В докладе обобщается опыт разработки САР авиационных и наземных ГТД, работающих на СВ (НК-88 на ТУ-155) или СПГ (НК-89 на ТУ-155 и НК-361 на магистральном газотурбовозе ГТ1-001).

В 80-х годах 20 века был создан ГТД НК-88 для работы на сжиженном водороде с гидромеханической двухконтурной каскадной системой регулирования и центробежным насосом (ЦН), приводимым от воздушной турбины (рис.1).

Внутренний контур состоит из турбо-насосного агрегата (ТНА), воздушного дросселя (ВД) и агрегата регулирования частоты вращения ротора ТНА (АР). Настройка статического регулятора частоты вращения ротора ТНА осуществлялась изодромным регулятором внешнего, основного контура ре-

гулирования ГТД. Регулирование внутреннего контура по частоте вращения ТНА, а не по расходу топлива, позволило упростить систему за счет исключения регулятора расхода криогенного топлива и замеров криогенных параметров.

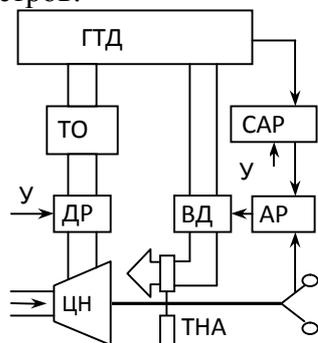


Рис. 1 Двухконтурная каскадная САР НК-88

Расход водорода определялся частотой вращения ЦН, его характеристикой и сопротивлением топливной магистрали. Положительное качество такой схемы – её функциональная надежность. В случае срыва насоса имелась возможность восстановления работы насоса. В системе использовалось форсирующее свойство топливной системы – опережение расхода насоса относительно частоты его вращения.

После разработки ПИД-регулятора основного контура, снижения инерционности ТО уменьшением его объёма и установки за насосом дросселя (ДР) получена устойчивая работа двух контуров с достаточным быстродействием при полной компенсации инерционности ротора ТНА и части запаздывания в ТО.

Для динамических испытаний САР НК-88 был создан автоматизированный комплекс средств частотного исследования с релейным гидравлическим пульсатором. При использовании комплекса были получены частотные характеристики системы и составляющих звеньев.

САР НК-89 (90-е годы) практически аналогична САР НК-88. Существенное отличие работы САР - запаздывание в ТО при работе на СПГ относительно работы на СВ увеличилось в 4...5 раз, что негативно сказалось на устойчивости основного контура. Из-за неустойчивости сверхзвукового течения воздуха в дросселе ВД при увеличенном расходе воздуха через турбину ТНА (весовой

расход СПГ относительно СВ увеличился в 2,7 раза) значительно повысилась интенсивность существовавших на НК-88 резонансных явлений во внутреннем контуре, приводящая к его автоколебаниям. При работе над НК-89 динамические проблемы не были решены, корректирующие средства не отработаны.

На НК-361 (ГТ1-001, 2006...2009 г.) была реализована одноконтурная САР с ЦН и электроприводом ЭД (рис. 2). Дросселем (ДЖ) регулировался расход сжиженного газа. На ДЖ регулятором перепада (РП) поддерживался постоянный перепад изменением частоты вращения насоса. Ввиду того, что перед подачей СПГ в основную ТО в топливомасляных теплообменниках (ТМТ) охлаждалось масло ГТД и генератора, суммарное запаздывание в теплообменниках относительно НК-89 увеличилось в несколько раз. Быстродействие системы на всех режимах оказалось небольшим (около 0,1 Гц). Частота переходных процессов определялась в основном запаздыванием в

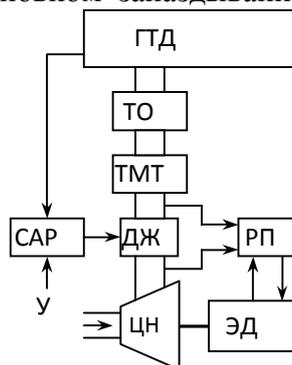


Рис. 2 Одноконтурная САР НК-361

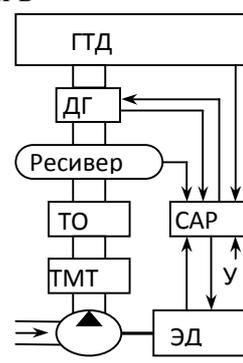


Рис. 3 САР НК-361 с двумя независимыми контурами

ТМТ и ТО. Регулирование постоянной мощности генератора, при котором коэффициент самовыравнивания объекта регулирования (свободной турбины с генератором) равен нулю, приводило к потере устойчивости.

В САР НК-361 на ГТ1-001 с двумя независимыми контурами, реализованной в 2010 г. ОАО "ВНИКТИ", установлен поршневой криогенный насос, ресивер и газовый дозатор ДГ (рис. 3). Регулирование давления в ресивере осуществляется изменением частоты вращения насоса. Контур регулирова-

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.

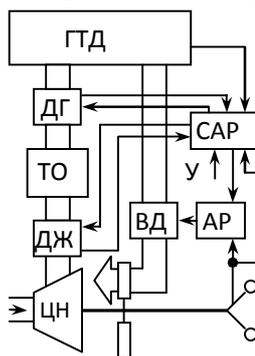


Рис. 4 Схема многоконтурной САР

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-