

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

© 2011 В. А. Букин¹, В. Ф. Руденко²

¹ОАО "КУЗНЕЦОВ", г. Самара

²ОАО "ВНИКТИ", г. Коломна Московской обл.

В докладе рассмотрены результаты доводки топливной системы газотурбовоза, работающего на СПГ.

Топливная система, газотурбовоз, сжиженный природный газ (СПГ), криогенный поршневой насос, газовый ресивер, теплообменник-испаритель.

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 двигателя 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 насосом. От такой схемы пришлось отказаться ввиду невозможности получить устойчивую работу системы регулирования из-за запаздывания газификации 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

выполнена коррекция исходной структуры. Во время её отработки установлены дополнительные клапаны, 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 с дополнительными клапанами и обогревом смесителя. На схеме не показаны вентили, клапаны захлаживания насоса, дренажа и заполнения РГ из «подушки» криогенной ёмкости, а также устройства, являющиеся типовыми для подобных систем.

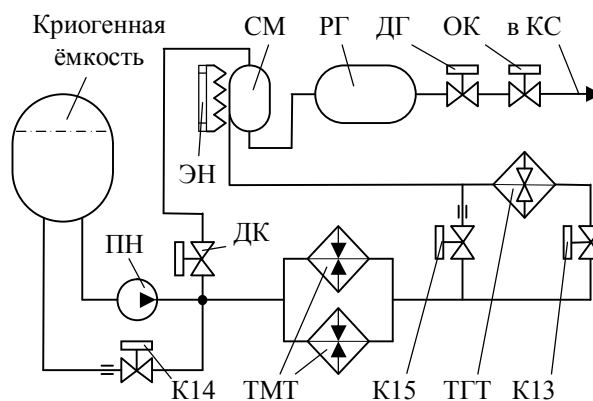


Рис. 1. Структурная схема топливной системы

С целью газификации СПГ во время заполнения ресивера до подачи топлива в камеру сгорания (КС) двигателя, когда нет теплового источника, используется смеситель (СМ). В начале отработки топливной системы такое заполнение сопровождалось попаданием сжиженного газа в ресивер. Для исключения попадания жидкой фазы в реси-

вер введён обогрев смесителя греющим гибким кабелем мощностью 2,7 кВт. Обогрев смесителя включается при подготовке к запуску и отключается после запуска двигателя. Перед запуском через дроссельный кран (ДК) к смесителю подается СПГ. При подаче 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. Запуски с «замороженным» масляным теплообменником двигателя приводили к росту температуры масла двигателя до опасных значений. Такого явления с ТМТ генератора не было, так как через него прокачивалось масло ещё до запуска. 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°C - предельно допустимую для ДГ. Для исключения замораживания масла в ТМТ при запуске К15 открывается одновременно с К13. На мощности генератора $N_{Г} = 2500$ кВт К15 закрывается.

Ввиду того, что допустимый минимальный расход насоса больше требуемого расхода двигателя на режиме холостого хода (ХХ), с выхода насоса выполнен перепуск в криогенную ёмкость через клапан К14 и дроссель. На ХХ и низких режимах К14 открыт. Закрывается К14, как и К15, на $N_{Г} = 2500$ кВт.

На рис. 2 приведена мнемосхема управления топливной системы газотурбовоза со всеми управляемыми элементами, в том числе и криогенной ёмкости.

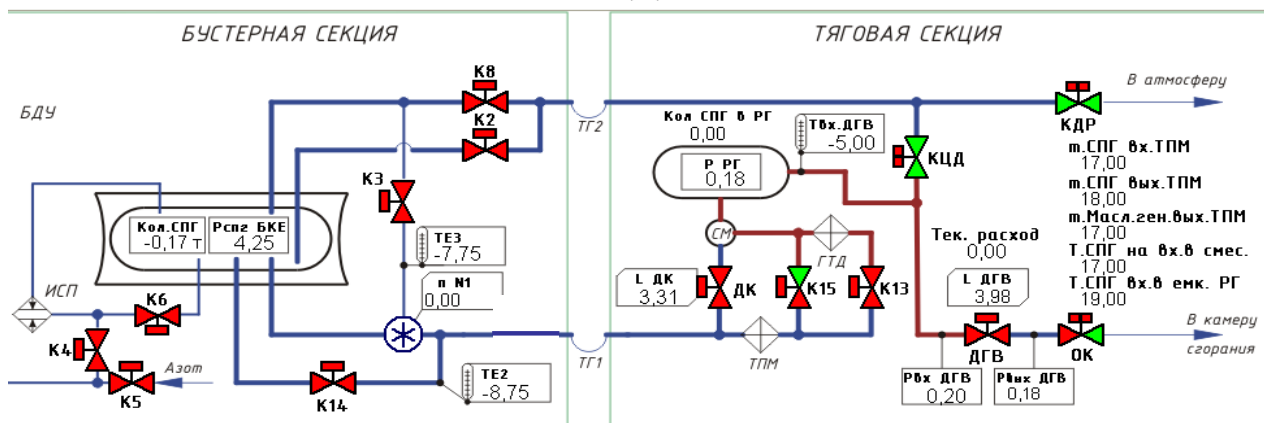


Рис. 2. Мнемосхема топливной системы СПГ газотурбовоза ГТ1-001

Процесс запуска зафиксирован на рис. 3. Подготовка к запуску начинается с открытия ДК и подачи газа из "подушки" криогенной ёмкости в ресивер через клапаны К8 и КЦД. Одновременно с открытием клапана К3 начинает захлаживаться криогенный насос. После выравнивания давления в криогенной емкости и ресивере (0,35...0,45 МПа) открывается К14, а криогенный насос выводится на минимальную частоту вращения. После достижения давления в ресивере 1,2 МПа насос останавливается, закрывается К14 и включается стартер двигателя. При раскрутке роторов двигателя стартёром давление в ресивере продолжает увеличиваться за счет газификации СПГ в смесителе.

За 5 с до подачи топлива в камеру сгорания двигателя насос повторно включается на минимальную частоту вращения. Для быстрого заполнения ресивера во время увеличения расхода топлива на запуске двигателя клапан К14 остаётся закрытым. Одновременно с включением насоса открываются К13 и К15, а ДК закрывается через 5 с - при подаче топлива в двигатель. После достижения давления в ресивере 1,6 МПа К14 открывается и вступает в работу регулятор давления в ресивере. Как видно из рис. 3, процесс запуска от захлаживания насоса, заполнения ресивера до выхода на режим ХХ не превышает 8 минут.

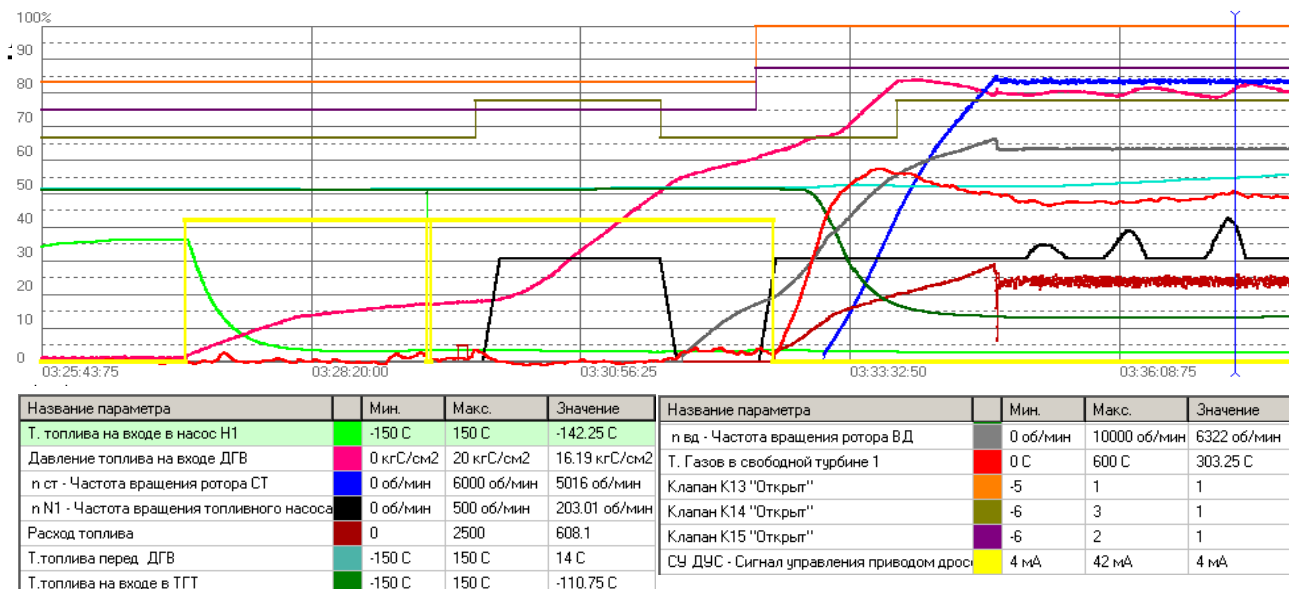


Рис. 3. Запуск топливной криогенной системы газотурбовоза ГТ1-001 и ГТД НК-361. Ходовые испытания. 18.01.2011 г.

На рис. 3 помещены также температурные параметры процесса заполнения ресивера и запуска: на входе в насос, за ТМТ, перед ДГВ и за турбиной двигателя.

На рис. 4 приведен процесс регулирования давления в ресивере и момент закрытия клапанов К14 и К15 на режиме $N_{Г} = 2500$ кВт.

Давление в ресивере поддерживается изменением частоты вращения криогенного насоса. Для оптимального открытия ДГ настройка регулятора плавно повышается с 1,6 МПа на ХХ до 3 МПа на максимальной мощности.

Ввиду того, что при регулировании расхода учитывается изменение давления и температуры газа перед ДГ, к регулятору давления в ресивере не предъявляется жестких требований. Колебания давления в реси-

вере не отражаются на работе системы регулирования двигателя.

Перед остановкой, во время охлаждения двигателя на режиме ХХ, криогенный насос переводится на минимальную частоту вращения. При этом давление в ресивере снижается 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 делают возможными работу двигателя и охлаждение масла некоторое время при отказе криогенного насоса. В такой нештатной ситуации перевод двигателя на режим ХХ, его охлаждение и останов не сопровождаются опасным повышением температур масла в ГТД и генераторе.

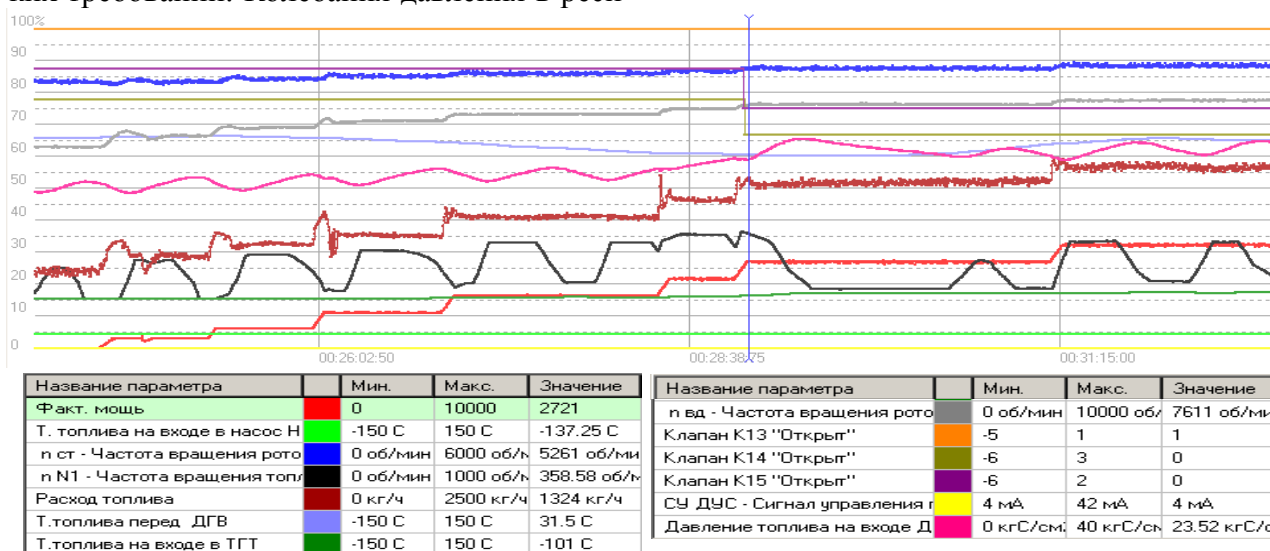


Рис. 4. Закрытие клапанов К14 и К15; Ходовые испытания; $N_{Г} = 0...3100$ кВт; 19.01.2011 г

Выводы

1. Выполнена коррекция структурной схемы топливной системы газотурбовоза с криогенным поршневым насосом и ресивером, а также её параметрическая и алгоритмическая отработка.

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

3. Влияние запаздывания теплообменников на работу системы регулирования ГТД отсутствует.

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

© 2011 V. A. Bukin¹, V. F. Rudenko²

¹JSC «KUZNETSOV», Samara,

²JSC «VNIKTI», Kolomna, Moscow Region

The report represents gas turbine locomotive LNG fuel system development results.

Fuel system, gas turbine locomotive, cryogenic piston pump, liquefied natural gas (LNG), gas receiver, gasifier.

Информация об авторах

Букин Валерий Афанасьевич, ведущий инженер конструкторского отдела ОАО «Кузнецов». Область научных интересов: проектирование и доводка систем автоматического регулирования газотурбинных двигателей.

Руденко Владимир Фёдорович, кандидат технических наук, заместитель генерального директора и главный инженер ОАО «ВНИКТИ». Область научных интересов: проектирование, тепловозов и их систем управления.

Bukin Valery Afanasyevich, position - leading engineer in experimental design bureau of JSC «KUZNETSOV». Area of research: gas turbine engine control system design and development.

Rudenko Vladimir Fedorovich, candidate of technical sciences, General Director Deputy and chief engineer in JSC «VNIKTI». Area of research: analysis, design and development of locomotives and their control systems.