

УДК 621.45.00.11.018.3

МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОТУРБОВОЗА НА СЖИЖЕННОМ ПРИРОДНОМ ГАЗЕ

В.А. Букин

ОАО "КУЗНЕЦОВ",
Заводское ш., 29, Самара,
Россия, г. Самара
443022
motor@kuznetsov-motors.ru

Статья посвящена разработке и доводке системы автоматического управления (САУ) магистрального газотурбовоза ГТ1h-001 с газотурбинным двигателем (ГТД) НК-361, работающим на сжиженном природном газе. Выполнен анализ динамических свойств исходной и модернизированной САУ, обоснованы структурные преобразования САУ и топливной системы. Приведены материалы по испытаниям газотурбовоза.

Ключевые слова: Газотурбовоз, САУ, сжиженный природный газ, динамические характеристики, исследование, рекомендации

Применение на газотурбовозе с газотурбинным двигателем сжиженного природного газа (СПГ) базируется на следующих принципах:

- перед подачей в камеру сгорания двигателя СПГ газифицируется;
- для охлаждения масла двигателя и электрического генератора используется хладоресурс криогенного топлива.

Охлаждение масла и предварительный подогрев СПГ с его частичной газификацией осуществляется в топливомасляных теплообменниках (ТМТ), установленных в топливной системе параллельно на выходе из насоса.

Окончательная газификация и подогрев криогенного топлива происходит в трубчатом топливогазовом теплообменнике (ТГТ), установленном за свободной турбиной ГТД.

Исходная САУ газотурбовоза ГТ1h-001 с газотурбинным двигателем НК-361 представляла систему с регулированием расхода СПГ в жидком состоянии до его газификации.

На рисунке 1 приведена функциональная схема системы управления. Система состоит из трёх контуров: контура регулирования ГТД, контура регулирования электрического генератора и контура регулирования электроприводного центробежного топливного насоса (ЭЦН).

Контур регулирования ГТД включает в себя дозатор СПГ (ДТ), газогенератор (ГГ) и свободную турбину двигателя (СТ), ПИД-регулятор ГТД. Два теплообменника ТМТ и один ТГТ, условно обозначенные одним те-

плообменником (ТО), также входят в этот контур. Основным регулируемым параметром контура является частота вращения свободной турбины $n_{СТ}$, дополнительными – параметры ограничения газотурбинного двигателя. Регулирующим фактором является расход СПГ в жидком состоянии $G_{ТЖ}$.

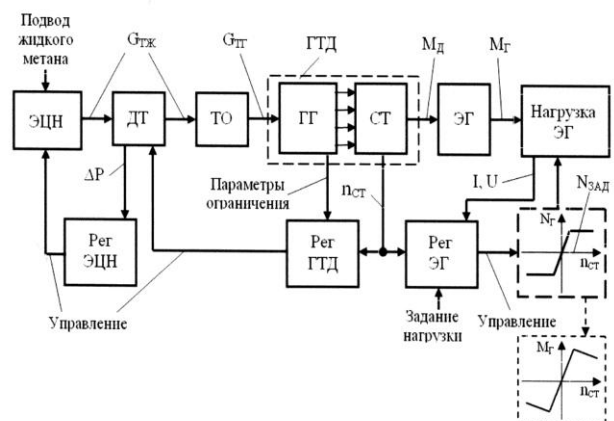


Рисунок 1. Функциональная схема системы управления ГТД и ЭГ

Контур регулирования электрического генератора (ЭГ) охватывает свободную турбину ГТД, генератор, его нагрузку и регулятор генератора. Режим силового блока устанавливается заданием требуемой мощности $N_{Зад}$ от 0 до 7500 кВт дискретно через 300 кВт на низких режимах и через 500...540 кВт - на высоких режимах. Поддержание нагрузки генератора осуществляется регулятором генератора в «коридоре мощности» с диапазоном около 300 кВт. До достижения границ (верхней и нижней) мощности регулируется момент генератора в прямой зависимости от частоты вращения свободной

турбины $M_T = f(n_{CT})$. Допустимость изменения мощности при заданной настройке только в определённых пределах обусловлено жёсткими ограничениями по продольным динамическим нагрузкам на состав.

Контур регулирования топливного насоса состоит из электроприводного центробежного насоса (ЭЦН), поддерживающего на дозаторе топлива постоянный перепад 6 кгс/см^2 изменением частоты вращения насоса $n_{ЭЦН}$.

Быстродействие системы на всех режимах оказалось небольшим с тенденцией уменьшения при увеличении мощности. Частота колебательных процессов составляла

$0,2 \dots 0,3 \text{ Гц}$ на холостом ходу и $0,09 \dots 0,15 \text{ Гц}$ на больших режимах. В зоне регулирования $M_T = f(n_{CT})$ контур n_{CT} является устойчивым. Переход с регулирования момента электрического генератора на поддержание постоянной мощности, при котором свободная турбина с генератором становится нейтрально устойчивым объектом регулирования (с нулевым значением коэффициента самовыравнивания), приводило к неустойчивости контура регулирования и развитию автоколебаний с амплитудой до 1000 об/мин по n_{CT} (рисунок 2).

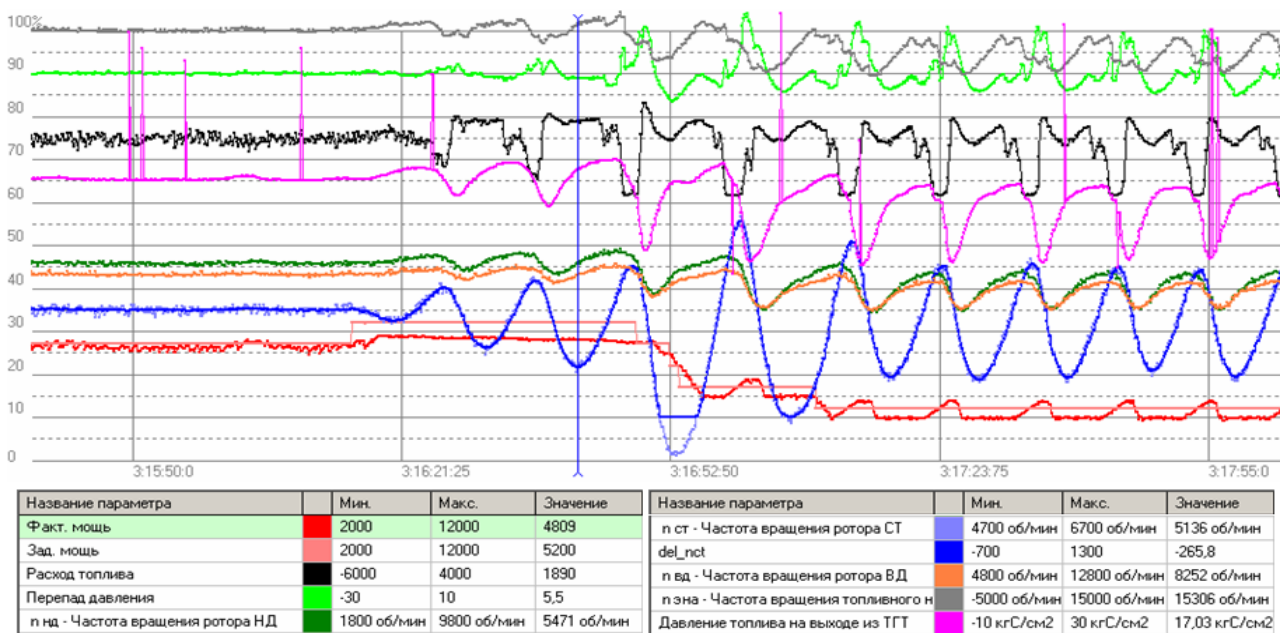


Рисунок 2. Возникновение неустойчивости контура n_{CT} на $N_T=4800 \text{ кВт}$ и автоколебания на $N_T=3200 \text{ кВт}$; ГТ1h-001; Ходовые испытания; 20.12.2008 г.; $f \approx 0,1 \text{ Гц}$

Проведённый анализ показал, что причина неустойчивости заключается в сочетании большого суммарного теплового запаздывания трёх теплообменников, которые входят в контур регулирования n_{CT} , и отсутствия самовыравнивания свободной турбины с генератором.

Динамические свойства теплообменников определены при анализе автоколебаний по важному динамическому свойству теплообменников-газификаторов, характеризующих их тепловое запаздывание — по частоте колебаний при отставании G_2 от $G_Ж$ в 180 градусов (f_{180}).

Известно, что в системах с кипящими аппаратами при неустойчивости могут возникать автоколебания жидкостного и газового расходов в противофазе, т.е. с отставанием на 180° [1]. Такие автоколебания отмечались и при испытаниях криогенных авиационных ГТД: НК-88 (на водороде) и НК-89 (на СПГ), имеющих в топливной системе теплообменник-газификатор [2]. Частота автоколебаний характеризует величину тепловой инерционности теплообменника.

На рисунке 3 представлены автоколебания в противофазе расходов G_2 и $G_Ж$ на холостом ходу газотурбовоза.

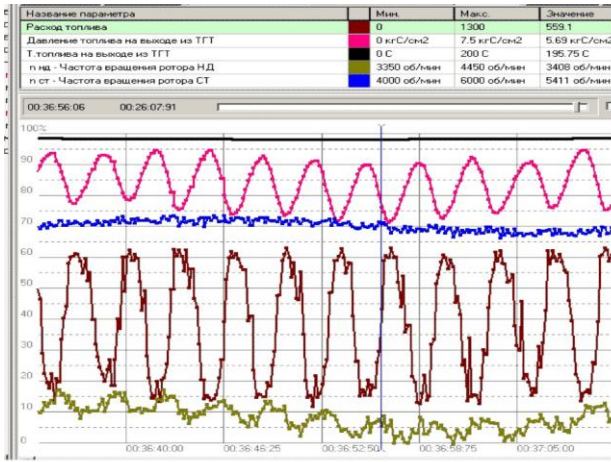


Рисунок 3. Автоколебания $G_{Ж}$ и $G_{Г}$ ($P_{ТГТ}$) на холостом ходу в противофазе ($f = 0,296$ Гц)

Похожий процесс большей амплитуды отмечался и при автоколебаниях на рисунке 2.

По результатам испытаний газотурбовоза получена зависимость частоты автоколебаний в противофазе $G_{Г}$ и $G_{Ж}$ от мощности и температуры $T_{ТГТ}$ газифицированного криогенного топлива (рисунок 4).

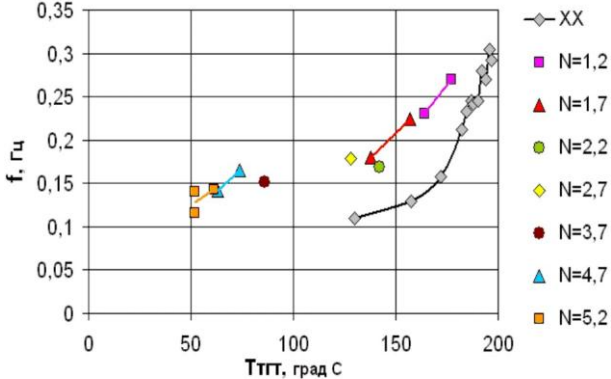


Рисунок 4. Зависимость частоты колебания параметров ТО от режима и $T_{ТГТ}$ при фазовом отставании $G_{Г}$ от $G_{Ж}$ в 180^0

По опыту аппроксимации характеристик теплообменника ГТД НК-88 [2] объединённые ТО двигателя НК-361 также аппроксимированы передаточной функцией, состоящей из четырёх аperiodических звеньев

$$W(s) = \frac{G_{ГВ}(s)}{G_{ЖВ}(s)} = \frac{1}{(T_{1ТО}s + 1)(T_{2ТО}s + 1)^3}$$

На рисунке 5 представлены логарифмические амплитудно-фазовые частотные характеристики (ЛАФЧХ) ТО, построенные по

данным графика (рисунок 4) при $T_{1ТО} = 4$ с и $T_{2ТО} = 1$ с ($f_{-180} = 0,12$ Гц) и при $T_{1ТО} = 1,6$ с и $T_{2ТО} = 0,4$ с ($f_{-180} = 0,3$ Гц). На этом графике помещены также ЛАФЧХ теплообменников ГТД НК-88 и НК-89, имеющие большую частоту f_{-180} (3 Гц и 1,5 Гц соответственно).

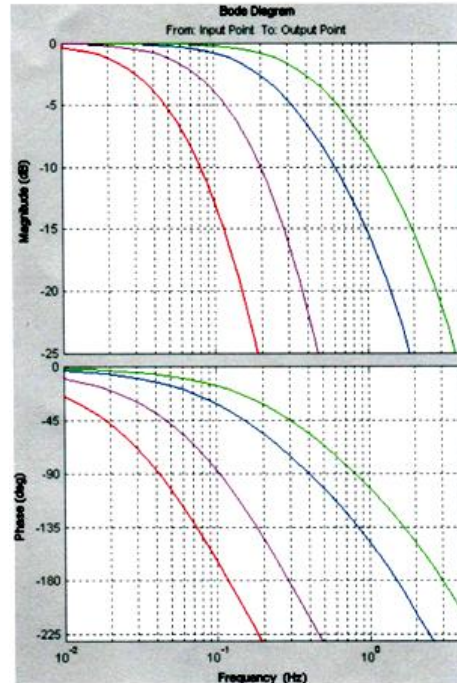


Рисунок 5. ЛАФЧХ ТО НК-361, НК-88 и НК-89

В 2010 г. в ОАО "ВНИКТИ" (г. Коломна Московской обл.) выполнена модернизация топливной системы газотурбовоза. Вместо центробежного насоса применён поршневой насос (ПН), а также установлены ресивер объёмом 2 м³ и газовый дозатор ДГ (рисунок 6).



Рисунок 6. САУ НК-361 с двумя независимыми контурами

Организовано два независимых контура – контур регулирования давления в ресивере и контур регулирования n_{CT} ГТД.

Регулирование давления в ресивере осуществляется изменением частоты вращения насоса. Так как при регулировании расхода газа САУ учитывает изменение давления и температуры газа перед ДГ, к точности поддержания параметров газа в ресивере нет особых требований.

Предварительно было выполнено моделирование исходной и модернизированной системы без влияния запаздывания ТО в контуре регулирования n_{CT} , что подтвердило неустойчивость исходной схемы и эффективность организации двух независимых контуров – контур регулирования n_{CT} при поддержании постоянной мощности стал устойчивым. На рисунке 7 приведены математические модели исходной и модернизированной системы, реализованные в программном пакете Matlab Simulink, а на рисунке 8 – переходные процессы при различных коэффициентах самовыравнивания.

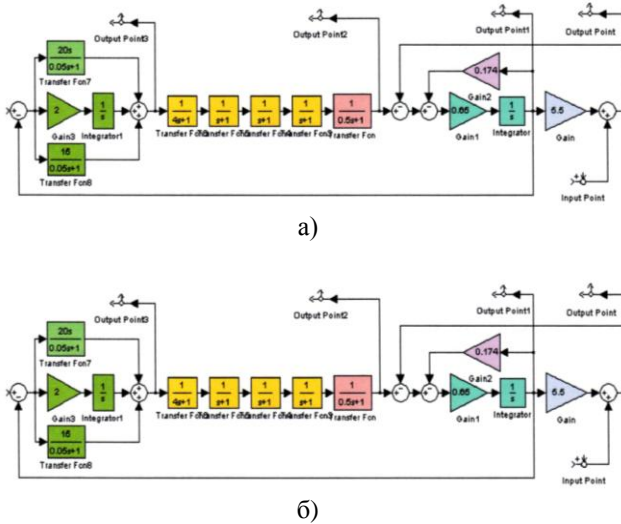


Рисунок 7. Математическая модель исходной (а) и модернизированной системы (б)

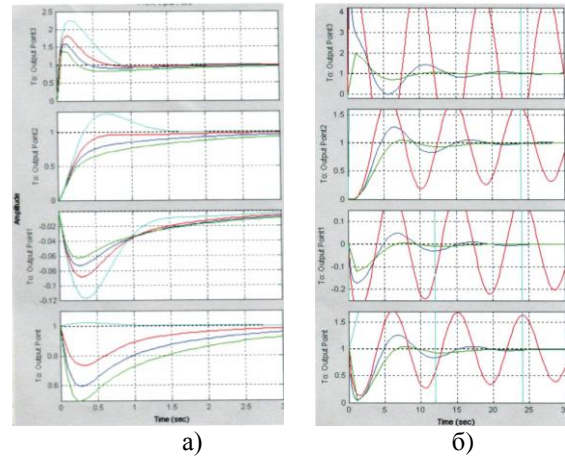


Рисунок 8. Переходные процессы модели исходной (а) и модернизированной САУ (б)

Контур регулирования n_{CT} ГТД стал устойчивым и приобрёл высокое быстродействие (рисунок 9). В декабре 2010 – январе 2011 г. успешно прошли ходовые испытания магистрального газотурбовоза ГТ1h-001 на Московской и Горьковской железных дорогах.

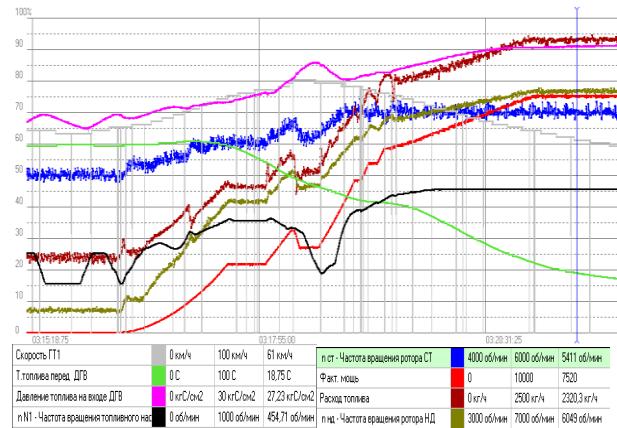


Рисунок 9. ГТ1h-001; $N_T = 0 \dots 7500$ кВт; ходовые испытания; вес состава 9200 т; $V_{сост} = 60 \dots 80$ км/час

Преимущества модернизированной системы:

- при поддержании постоянной мощности электрического генератора контур регулирования n_{CT} стал устойчивым;
- частота переходного процесса повысилась до 0,5...1 Гц;
- время захлаживания поршневого насоса перед запуском, по сравнению с центробежным насосом, значительно сократилось и не превышает трех минут;
- не требуется высокая точность поддержания давления газа в ресивере $P_{рес}$.

В связи с тем, что более 50% времени га-

зотурбовоз эксплуатируется на низких мощностях, в том числе и на холостом ходу, в 2013 г. произведена перестройка диапазонов частот свободной турбины с диапазона 5000...5400 об/мин на диапазон 3000...5400 об/мин, что позволило:

- уменьшить расход топлива на низких режимах, причём расход топлива на холо-

стом ходу уменьшился в 1,5 раза;

- исключить обрыв проводов контактной сети за счёт уменьшения температуры и скорости выхлопных газов.

На рисунке 10 приведены параметры газотурбовоза при испытаниях с перестроенным диапазоном частот свободной турбины.

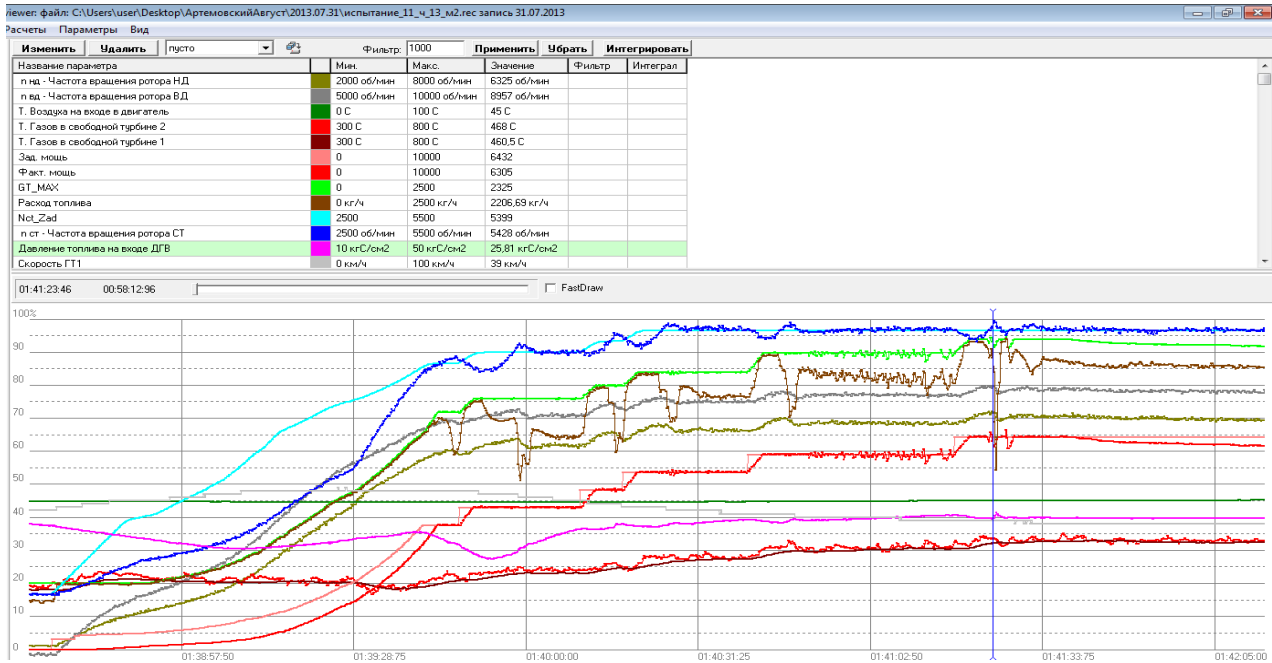


Рисунок 10. ГТ1h-001; $N = 0...6300$ кВт; $n_{CT} = 3000...5400$ об/мин; $V_{COCT} = 38...48$ км/час; Свердловская ЖД; 31.07.2013 г

Для обеспечения работы модернизированной САУ топливная система также была преобразована.

На рисунке 11 приведена структурная схема топливной системы. На схеме не показаны вентили, клапаны захолаживания насоса, дренажа и заполнения РГ из «подушки» криогенной ёмкости, а также устройства, являющиеся типовыми для подобных систем.

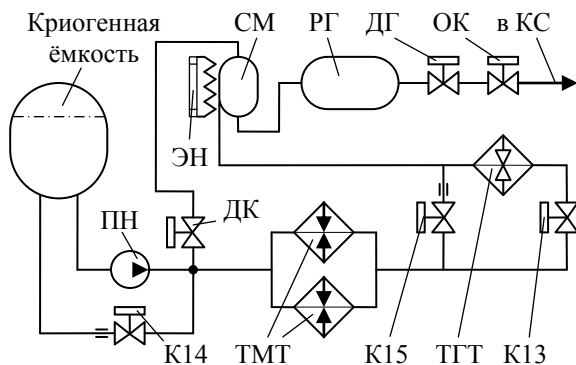


Рисунок 11. Структурная схема топливной системы

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 ресивер введён обогрев смесителя греющим гибким кабелем. Обогрев смесителя включается при подготовке к запуску и отключается после запуска двигателя. Перед запуском через дроссельный кран (ДК) к смесителю подаётся 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 рисунке 12 приведена мнемосхема управления топливной системы газотурбовоза со всеми управляемыми элементами.

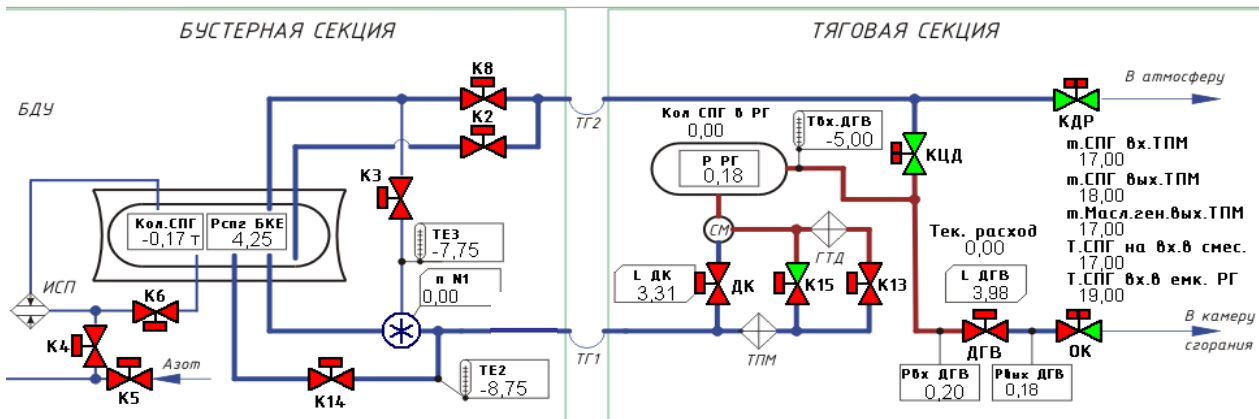


Рисунок 12. Мнемосхема топливной системы СПГ газотурбовоза

Процесс запуска зафиксирован на рисунке 13. 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 счёт газификации СПГ в смесителе.

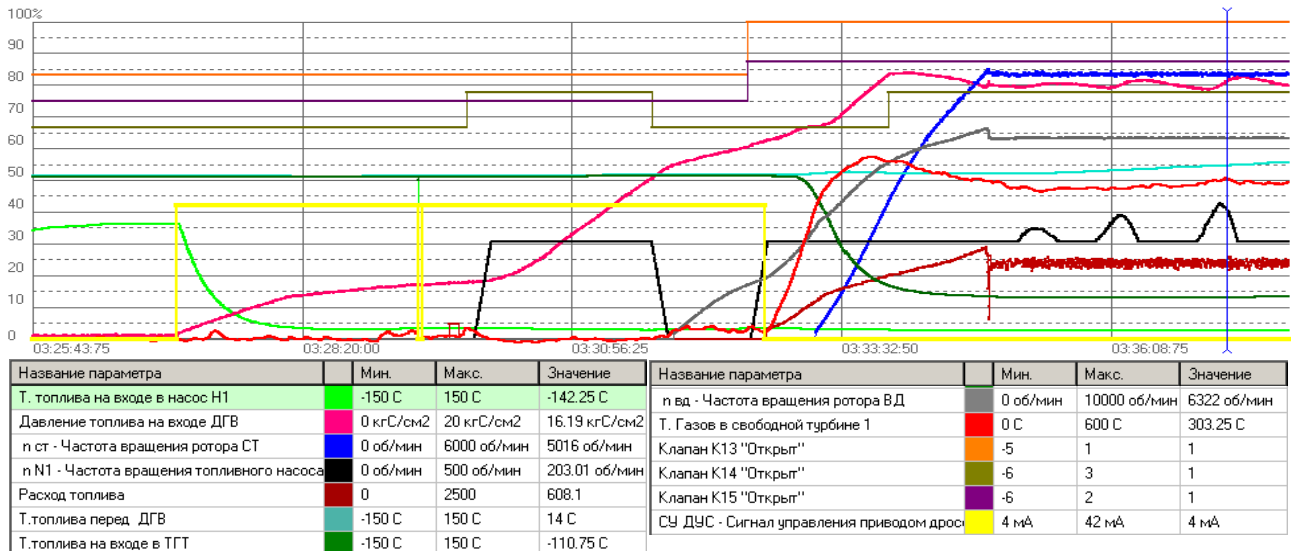


Рисунок 13. Запуск топливной криогенной системы газотурбовоза ГТ1-01 и ГТД НК-361.18.01.2011 г.

На рисунке 13 помещены также температурные параметры процесса заполнения ресивера и запуска: на входе в насос, за ТМТ, перед ДГВ и за турбиной двигателя.

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.

В результате модернизации топливной системы и САУ отрицательное влияние запаздывания теплообменников на работу ГТД

и газотурбовоза устранено.

Список использованных источников

- [1] Морозов И.И., Герлига В.А. Устойчивость кипящих аппаратов. М.: Атомиздат, 1969.
- [2] Букин В.А. Экспериментальные динамические характеристики теплообменников-газификаторов водородного ГТД НК-88 и НК-89. //Международный научно-технический форум, посвященный 100-летию ОАО «Кузнецов» и 70-летию СГАУ, Самара, 5-7 сентября 2012 года: Сборник трудов в 3 томах. Том 2. Самара: Изд. СГАУ, 2012, - 191...193 с.

MODERNIZATION OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEM FOR LNG MAINLINE GAS TURBINE LOCOMOTIV

V.A. Bukin

JSC «KUZNETSOV»
Zavodskoye Chosse, 29,
Samara, 443022, Russia
motor@kuznetsov-motors.ru

The article is concerned with modernization of automatic control system for mainline gas turbine locomotive GT1h-001 with a gas turbine engine NK-361, working on liquefied natural gas (LNG). It contains dynamic response analysis of original and modernized automatic control system, justified structural adjustments of automatic control system and fuel system, and test data for gas turbine locomotive.

Key words: Turbo-engine, system of automatic control, condensated natural gas, dynamic descriptions, research, recommendations

References

- [1] Morozov I.I., Gerliga V.A. Ustojchivost' kipjashhih apparatov. M.: Atomizdat, 1969.
- [2] Bukin V.A. Jeksperimental'nye dinamicheskie harakteristiki teploobmennikov-gazifikatorov vodorodnogo GTD NK-88 i NK-89. //Mezhdunarodnyj nauchno-tehnicheskij forum, posvjashhennyj 100-letiju OAO «Kuznecov» i 70-letiju SGAU, Samara, 5-7 sentjabrja 2012 goda: Sbornik trudov v 3 tomah. Tom 2. Samara: Izd. SGAU, 2012, -191...193 s.