

УДК 629.124:

А.И. ТАРАСЕНКО, А.А. ТАРАСЕНКО

Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина

ОСОБЕННОСТИ ЦИФРОВОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ГТД ДЛЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ НА ПУСКОВЫХ И РАБОЧИХ РЕЖИМАХ

Рассматривается газотурбинный двигатель (ГТД) со свободной силовой турбиной, работающей на электрогенератор. Газотурбинный двигатель укомплектован системой автоматического управления (САУ) с регулятором на основе управляющей ЭВМ. Топливо ГТД – природный газ. Рассмотрены вопросы дозирования топлива в момент розжига, в процессе запуска, выхода на холостой ход двигателя и в процессе работы генератора под нагрузкой (в сеть). Показана возможность и условия применения пропорционального регулирования. Даны рекомендации по предотвращению превышения частоты при резком сбросе нагрузки на генератор.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, свободная силовая турбина, дозировка топлива, пропорциональное регулирование, сброс нагрузки.

Введение

Применение цифровой техники для управления и регулирования газотурбинного двигателя широко известно. Управление и особенно регулирование сильно зависят от используемой аппаратной базы и структуры цифровых средств [1]. Рассматриваются некоторые вопросы регулирования газотурбинного двигателя с помощью IBM совместимого вычислительного комплекса.

1. Формулирование проблемы

Необходимо рассмотреть особенности работы цифровой системы управления и регулирования на различных режимах работы газотурбинного двигателя. Газотурбинный двигатель работает на природном газе и осуществляет привод электрогенератора в условиях автономно работающей электростанции.

Цель работы – сформулировать рекомендации по применению цифровой системы управления и регулирования, рассмотрев ее работу на различных режимах работы газотурбинного двигателя.

Общие соотношения

Цифровой регулятор отличается от аналоговых тем, что может сравнительно просто переходить от одной характеристики к другой. Регулятор на основе IBM совместимой ЭВМ позволяет сравнительно легко сформировать нелинейную или кусочно-линейную характеристику. Важно, что IBM совместимый регулятор может осуществить ограничения топливоподачи по сложному нелинейному алгоритму, который учитывает данные получаемые от датчиков системы автоматического управления (САУ).

При использовании контроллеров в качестве аппаратной базы также можно решить выше перечисленные вопросы, однако это будет не так быстро.

Цифровой регулятор может реализовать любую внешнюю (регуляторную) характеристику ГТД. Характеристика для двигателя, работающего на электрогенератор, показана на рис. 1.

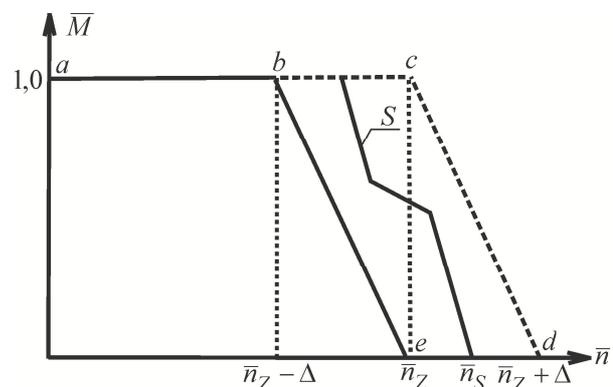


Рис. 1. Регуляторная характеристика газотурбинного двигателя электростанции

На рис. 1 линия «a-b-e» соответствует холостому ходу генератора. Скорость вращения в точке «e» соответствует частоте сети. Эта частота близка к 50Гц, а для свободной силовой турбины скорость вращения, как правило, около 3000 об/мин. Линия «a-c-d» соответствует режиму максимальной мощности. Линия «S» – это линия работы под нагрузкой. Величина нагрузки приходящейся на двигатель определена скоростью \bar{n}_S заданной оператором. Наклон характеристики (жесткость регулятора) определена величиной Δ . Для электростанций величина

$\Delta = 0,04$, что соответствует требуемым 4%. Наклон характеристики нужен для совместной работы нескольких машин и для работы с сетью. Следует отметить, что скорость генератора для всех линий, показанных на рис. 1 одинакова, а мощность разная.

Для системы двигатель – регулятор характерно запаздывание. Время запаздывания складывается из ряда факторов. Это время замеров, время исполнения команд и время разгона или торможения газогенератора. В работе [2] получено выражение для предельно допустимого времени запаздывания

$$\tau_z < \Delta \cdot T_{СТ},$$

где τ_z – время запаздывания;

$T_{СТ}$ – постоянная времени комплекса «силовая турбина – ротор электрогенератора».

Величина $\Delta = 0,04$. Постоянная времени это величина порядка 3 – 5с. Тогда $\tau_z < 0,12...0,2$ с.

Погрешность в определении допустимого времени запаздывания идет в запас, но учитывая время переходного процесса газогенератора, которое равно 0.1...0.3 с, следует применить быстродействующий регулятор.

2. Цифровое регулирование ГТД на различных режимах

В процессе работы газотурбинный двигатель пребывает на разных режимах работы. Система автоматического управления (САУ) должна отследить переход ГТД с одного режима на другой.

2.1. Включение стартеров и разгон ГТД без подачи топлива

В корабельных ГТД, которые используют в энергетике стартерный привод подключается и отключается от вала турбокомпрессора с помощью обгонной муфты. На включение обгонная муфта не срабатывает мгновенно. Отрезок времени до включения муфты стартерный привод вращается без нагрузки набирая скорость. При включении муфты могут возникать переходные процессы, при которых полумуфты могут размыкаться, а рессоры могут получить повреждения [3]. Современные методы управления электроприводом позволяют осуществить включения обгонной муфты на низкой скорости вращения, что позволит избежать повреждений.

При применении привода переменного тока есть смысл использовать частотное управление асинхронным электродвигателем. Преобразователь (его часто называют инвертором) есть смысл использовать с возможностью работы по пятиточечной характеристике. Важно, чтобы асинхронный

электродвигатель не перешел на не рабочую часть своей характеристики. С этой целью система автоматического управления должна формировать задание, для преобразователя исходя из замеренной скорости вращения контуров.

В случае применения привода постоянного тока есть смысл применить регулируемое независимое возбуждение и регулируемое силовое питание. В настоящее время это сделать не трудно.

2.2. Подача топлива, розжиг

При достижении необходимой для розжига скорости вращения компрессора высокого давления (эта скорость задается разработчиками двигателя) включается система розжига и начинается управление клапаном пускового газа воспламенителя. Через заданное разработчиком время подается запальная доза топлива. Газовая смесь не должна подаваться заведомо много потому, что двигатели как правило, имеют аварийную защиту по давлению в момент розжига (защита по первому броску). Если подать газа мало то горение может прекратиться и сработает аварийная защита по погасанию.

Параметры дозирующих клапанов на малых подачах топлива не очень повторяемы от клапана к клапану. Поэтому положение дозатора при розжиге надо подобрать экспериментально. При этом важно зафиксировать температуру устойчивого горения и температуру наружного воздуха.

При изменении температуры наружного воздуха запальную дозу топливного газа надо менять. Можно предложить формулу для ее определения

$$\bar{G}_r = \frac{\frac{T_{кc}}{T_0 \cdot \bar{T}} - 1}{\frac{T_{кc}}{T_0} - 1},$$

где $T_{кc}$ – температура устойчивого горения при розжиге;

T_0 – стандартная температура наружного воздуха;

\bar{T} – отношение фактической температуры наружного воздуха к стандартной температуре наружного воздуха;

Из приведенной выше формулы следует, что с понижением температуры воздуха на входе запальную дозу газа следует увеличить.

2.3. Разгон газогенератора в режиме сопровождения стартерами

После розжига подачи топлива плавно, в зависимости от времени, повышают вплоть до отключения стартеров. С увеличением скорости вращения

крутящий момент стартеров падает (случай постоянной мощности). Кроме того необходимо учитывать прочностные ограничения электрических машин. Поэтому этап сопровождения ограничен. Важно, чтобы после отключения стартеров газогенератор остался в равновесном состоянии. Топливоподача в момент отключения стартеров должна быть либо рассчитана либо подобрана экспериментально.

2.4. Выход двигателя на режим прогрева и регулирование скорости силовой турбины

Выход газогенератора на режим прогрева не требует резких маневров и временные показатели его не критичны. Резкие изменения подачи топлива не желательны из-за опасности срыва потока в компрессорах. На низких скоростях КПД турбомашин низкий. Поэтому резкое увеличение подачи топлива опасно.

Целесообразно задать большой величину Δ (см рис.1) и постепенно увеличивать заданную скорость вращения.

На рис. 2.приведен график зависимости параметров газотурбинного двигателя от времени запуска.

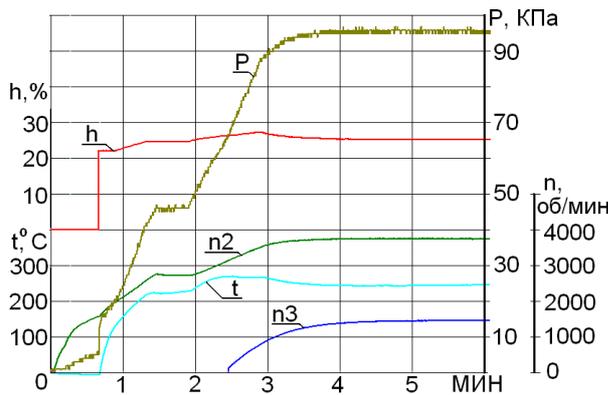


Рис. 2. Пуск газотурбинного двигателя

На рис.2 показаны зависимости от времени следующих параметров:

- n_2 – скорость вращения компрессора высокого давления;
- n_3 – скорости вращения свободной силовой турбины;
- t – температура за турбиной высокого давления;
- P – давление перед форсунками;
- h – положение дозатора топлива.

На графиках рис. 2 четко виден первый бросок давления (40я секунда); отключение стартеров (120я секунда). Выход на режим прогрева происходит начиная со второй минуты и заканчивается на четвертой минуте.

Время прогрева и скорость n_2 , при которой этот режим осуществляется, назначается изготовителем двигателя.

После завершения режима прогрева осуществляется дальнейший разгон газогенератора до тех пор пока скорость вращения силовой турбины n_2 не приблизится к синхронной скорости генератора на заданную величину.

На рис. 3 показан процесс перехода на начало автоматического регулирования (НАР) скорости силовой турбины n_3 .

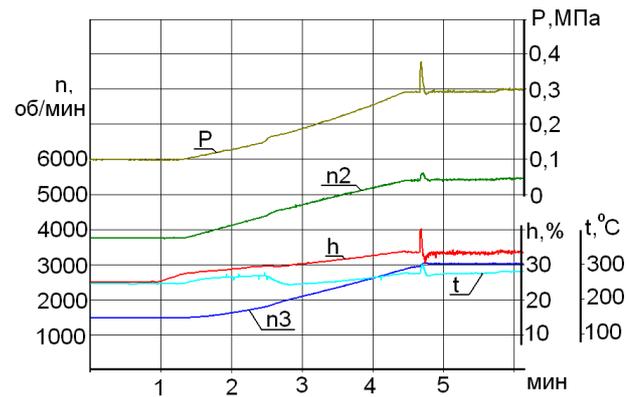


Рис. 3. Переход на НАР с закрытием ЛПВ

На рис. 3 показаны те же параметры что и на рис. 2. На первой минуте графика рис. 3 завершается режим прогрева. Примерно на второй с половиной минуте закрывается лента перепуска воздуха (ЛПВ). Закрытие ЛПВ сопровождается понижением температуры, но из-за того, что регулятор настроен не жестко резких изменений топливоподачи нет.

На рис. 4 показан переход на НАР при разных n_3 .

На рис. 4 показаны переходы на НАР с 2800 об/мин и с 2950 об/мин. Целесообразность перехода с 2950 об/мин очевидна. При приближении к синхронной частоте необходимо поменять параметр регулирования (перейти с регулирования n_2 на регулирование n_3) и регулировать жестче ($\Delta = 0,04$).

Требование о переходе на НАР с 2800 об/мин продиктовано применением аналоговых гидравлических регуляторов. Для электронных регуляторов можно рекомендовать переход с 2950 об/мин силовой турбины.

Следует отметить, что приведенные на рис. 2 - рис. 4 графики получены экспериментально в условиях автономно работающей электростанции. Это относится ко всем приведенным ниже графикам. При формировании графиков какой-либо обработки данных не предпринималось. Это касается и температуры. На графиках показана замеренная температура, которая отличается от фактической.

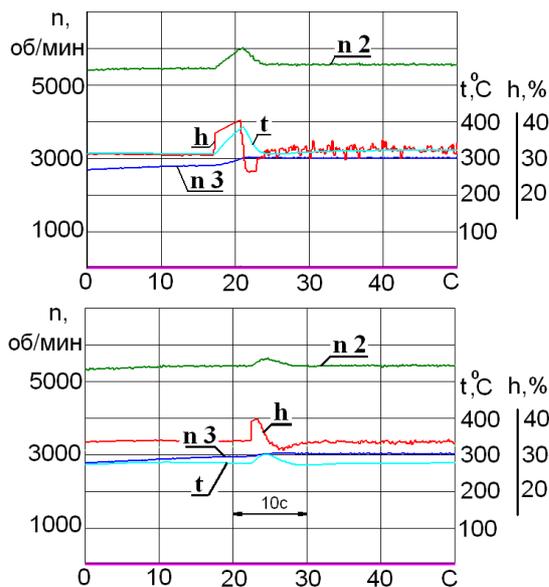


Рис. 4. Переход на НАР с 2800 об/мин и с 2950 об/мин

2.5. Работа под нагрузкой

Процесс взятия нагрузки показан на рис. 5.

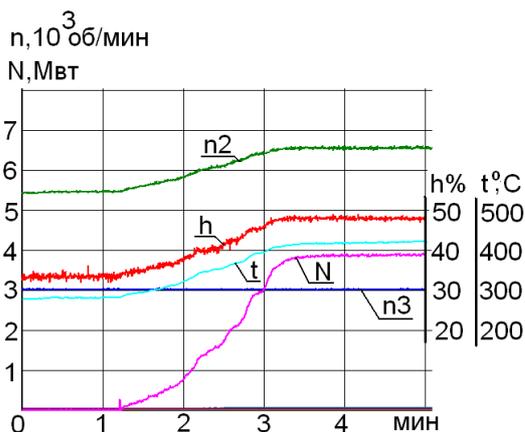


Рис. 5. Процесс взятия нагрузки двигателем

На рис. 5 приведен процесс взятия нагрузки. Нагрузка принимается путем увеличения задания для регулятора \bar{n}_S (см.рис.1). Из графиков видно, что скорость вращения n_3 остается постоянной, а активная мощность генератора N возрастает. Нагрузка при этом принимается мягко. На графике рис. 5 виден момент синхронизации генератора с сетью. С этого графика видна возможность плавной передачи нагрузки от одного двигателя другому.

При эксплуатации двигателя возможны случаи внезапного сброса и приема нагрузки. При сбросе нагрузки скорость вращения силовой турбины может превысить допустимую величину. Такое превышение скорости силовой турбины n_3 возможно при работе электростанции в автономном режиме. Если работает

один или два двигателя, то резкий сброс нагрузки может вызвать срабатывание защиты от разнота и остановку (погасание) электростанции. Обесточивание некоторых объектов нежелательно. Это оправдывает меры по предотвращению превышения скорости вращения силовой турбины. На рис. 6 показан переходный процесс при сбросе и взятии нагрузки.

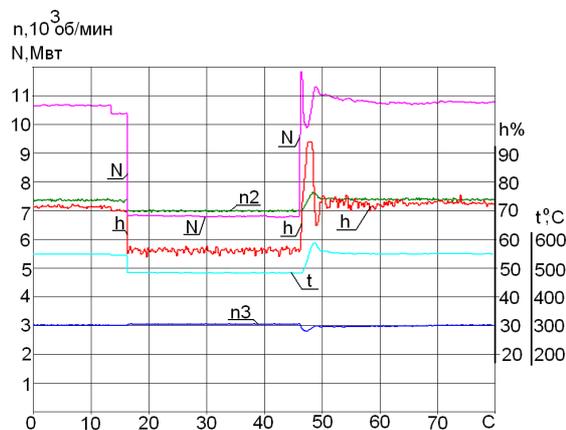


Рис. 6. Процесс сброса и взятие нагрузки

Из рис. 6 видно, что при сбросе нагрузки согласно характеристике рис. 1 скорость силовой турбины возрастает и система переходит в область более жесткого регулирования. Это видно по увеличенным колебаниям положения дозатора h . Следует отметить, что после взятия нагрузки скорость силовой турбины уменьшается и колебаниям положения дозатора h уменьшается.

На рис. 7 показан полный сброс нагрузки путем отключения высоковольтного выключателя.

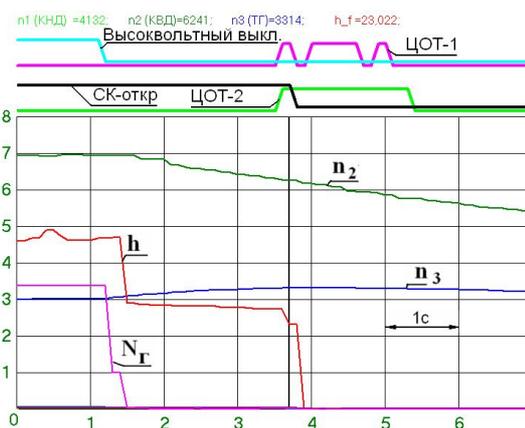


Рис. 7. Процесс полного сброса нагрузки путем отключения высоковольтного выключателя

График на рис. 7 показывает повышенную опасность полного сброса нагрузки. В переходном процессе, показанном на рис. 6 абсолютная величина сброса больше, чем на рис. 7, но в переходном процессе рис. 7 срабатывает защита от разнота. При частичном сбросе нагрузки, показанном на рис. 6 превышение скорости маловероятно.

Анализ переходных процессов показывает, что двигатель Д014 запасает 5 МДж. Чтобы удержать двигатель эту энергию нужно рассеять. Следует отметить, что от момента сброса нагрузки до срабатывания защиты проходит одна или две секунды. Этого времени достаточно для коммутации. Рассеять энергию можно подключив к генератору дополнительную нагрузку. Речь идет о подключении на 0,5-2 секунды через 0,25-0,5 секунды после начала сброса. Здесь следует отметить, что если организовать короткое замыкание генератора, то защита срабатывает через десять секунд. Иными словами если нагрузка сброшена до нуля, то можно организовать короткое замыкание генератора на 0,5-1,0 секунды. Столь «варварский» метод авторы рекомендуют не решать, но указать на него считают возможным. Если в качестве балласта взять чугун весом 100 кг то 5 МДж нагреют его на 100 °С. Размеры такого балласта будут сопоставимы с бытовым нагревателем.

Заключение

Использование пропорционального регулирования позволяет работать ГТД электростанции.

Поступила в редакцию 8.06.2013, рассмотрена на редколлегии 17.06.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф. М.Р. Ткач, Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев.

ОСОБЛИВОСТІ ЦИФРОВОГО РЕГУЛЮВАННЯ ГТД ДЛЯ ЕЛЕКТРОСТАНЦІІ НА ПУСКОВИХ ТА РОБОЧИХ РЕЖИМАХ

О.І. Тарасенко, О.О. Тарасенко

Розглядається газотурбінний двигун (ГТД) з вільною силовою турбіною, який працює на електрогенератор. Газотурбінний двигун укомплектовано системою автоматичного управління (САУ) з регулятором на базі управляючої ЕОМ. Паливо ГТД – природний газ. Розглянуті питання дозування палива при підпаленні, в процесі пуску, виходу на холостий хід двигуна і в процесі роботи генератора під загрузкою (в мережу). Показані можливість та умови використання пропорційного регулювання. Наведено рекомендації що до запобігання підвищення частоти при різкому зменшенні загрузки на генератор.

Ключові слова: газотурбінний двигун, вільна силова турбіна, дозування палива, пропорційне регулювання, різке зменшення загрузки.

DETAILS OF DIGITAL CONTROL FOR POWER PLANT GTE ON STARTING AND OPERATING MODES

A.I. Tarasenko, A.A. Tarasenko

We study a gas turbine engine (GTE) with a free power turbine running for the electric generator. The gas turbine engine is equipped with an automatic control system (ACS) with the controller based on the control computer. The GTE fuel is natural gas. Aspects of the fuel metering at the ignition in the startup process, the output at engine idling and during generator operation under load (in the network) are reviewed. The possibility and conditions of use proportional control is shown. The recommendations for the prevention of excess frequency during heavy load shedding in the generator are also given.

Keywords: gas turbine engine, a free power turbine, the dosage of fuel, proportional control, load shedding.

Тарасенко Александр Иванович – канд. техн. наук, доц., доц. каф. механики и конструирования машин Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина, e-mail: tai777@ukrpost.net,

Тарасенко Александр Александрович – аспирант каф. турбин Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина, e-mail: tai777@ukrpost.net.

При резких сбросах нагрузки целесообразно использовать подключаемые к генератору балласты. Времени для подключения балластов достаточно одна и более секунд.

Балласт следует подключить на время от трех до пяти секунд.

Литература

1. Тарасенко, А.И. Выбор программных и аппаратных средств САУ теплового двигателя [Текст] / А.И. Тарасенко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2009. – № 7 (64). – С. 164–167.

2. Тарасенко, А.И. Переходные процессы в малооборотном дизеле с регулятором на основе управляющей ЭВМ [Текст] / А.И. Тарасенко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2009. – № 9 (66). – С. 49–54.

3. Крючков, Ю.С. Динамика процесса пуска ГТД при работе системы в упругой области [Текст] / Ю.С. Крючков, В.С. Подгуренко, А.И. Тарасенко // *Проблемы прочности*. – 1986. – № 11. – С. 110–115.