НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
НАУКА И МИРОВОЗЗРЕНИЕ

УДК-621.438

СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ, ПУСКА И ЗАЩИТЫ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК: ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИ

Аннагельдиев Довлетгельди
Преподаватель, Международного университета нефти и газа имени Ягшыгелди Какаева
г. Ашхабад Туркменистан

Маммедов Довран
Студент, Международного университета нефти и газа имени Ягшыгелди Какаева
г. Ашхабад Туркменистан

Бабаева Гульшат
Студент, Международного университета нефти и газа имени Ягшыгелди Какаева
г. Ашхабад Туркменистан

Союнов Гочмырат
Студент, Международного университета нефти и газа имени Ягшыгелди Какаева
г. Ашхабад Туркменистан

Аннотация

В статье рассматриваются принципы регулирования газотурбинных установок, особенности построения систем автоматического управления и назначение пусковых и защитных устройств. Анализируются основные параметры, определяющие устойчивость работы газовой турбины: частота вращения ротора, температура газов, давление и расход топлива, параметры компрессора, вибрационное состояние и характеристики смазочной системы. Раскрываются функции регуляторов скорости, температурных ограничителей, исполнительных механизмов топливной системы и устройств управления направляющими аппаратами компрессора. Особое внимание уделяется последовательности автоматического пуска, подготовке вспомогательных систем, продувке газовоздушного тракта, воспламенению топливовоздушной смеси и переходу агрегата к самостоятельной работе. Рассматриваются основные виды защит, включая защиту от превышения частоты вращения, недопустимого повышения температуры, погасания пламени, снижения давления масла, повышенной вибрации и аварийных отклонений параметров топливоснабжения. Отдельно анализируется взаимодействие технологической автоматики, системы аварийного останова и операторского управления.

Ключевые слова: газотурбинная установка, автоматическое регулирование, система управления, пусковое устройство, защитная автоматика, частота вращения, топливная система, контроль пламени, аварийный останов, промышленная энергетика.

Назначение системы регулирования газотурбинной установки

Газотурбинная установка представляет собой сложный энергетический агрегат, в котором преобразование химической энергии топлива в механическую работу происходит посредством сжатия воздуха, сжигания топлива и расширения горячих газов в турбинной части. Работа отдельных элементов установки взаимосвязана: изменение подачи топлива отражается на температуре газов, частоте вращения ротора, мощности и тепловом состоянии деталей. Поэтому нормальная эксплуатация агрегата невозможна без согласованного управления его основными параметрами.

Система регулирования предназначена для поддержания заданного режима работы при изменении нагрузки и внешних условий. В энергетических установках она должна обеспечивать требуемую частоту вращения генератора и устойчивость выработки электроэнергии. В приводных газотурбинных агрегатах, используемых для приведения в действие компрессоров и насосов, регулируемым параметром может выступать частота вращения выходного вала или производительность приводимого оборудования.

Важнейшая особенность газовой турбины заключается в высокой динамичности тепловых и газодинамических процессов. Увеличение подачи топлива не приводит к мгновенному изменению мощности: сначала изменяются параметры рабочего тела, затем возрастает энергия газового потока и изменяется механическое состояние ротора. Одновременно необходимо учитывать допустимую температуру деталей горячего тракта, пределы работы компрессора и механические нагрузки на вращающиеся элементы.

Поэтому регулятор не может управлять установкой только по одному сигналу. В современной системе используются измерения нескольких параметров, а управляющее воздействие формируется с учётом ограничений, которые не должны нарушаться даже при изменении нагрузки. Например, запрос на увеличение мощности может быть ограничен температурным состоянием турбины или допустимым расходом топлива.

Система регулирования должна обеспечивать плавное изменение режима, предотвращать чрезмерные колебания параметров и поддерживать устойчивость работы во всём предусмотренном диапазоне нагрузок. При этом её функции необходимо отделять от функций защитной автоматики. Регулирование стремится сохранить нормальную работу агрегата, тогда как защита должна предотвратить развитие опасной ситуации, если обычные средства управления уже не способны удержать параметры в допустимых пределах.

Международный стандарт ISO 19859:2016 рассматривает системы управления и контрольно-измерительное оборудование как составные части энергетического газотурбинного комплекса наряду с топливным, смазочным, пусковым и вспомогательным оборудованием. Такой подход подчёркивает, что регулирование нельзя проектировать отдельно от конструкции и технологической схемы всей установки.

Основные регулируемые параметры и принципы автоматического управления

Одним из главных параметров газотурбинной установки является частота вращения ротора. В агрегатах, непосредственно связанных с электрическим генератором, она должна соответствовать условиям работы электрической сети. При изменении нагрузки генератора возникает рассогласование между механической мощностью турбины и электрической мощностью, потребляемой сетью. Если подача топлива не будет своевременно скорректирована, частота вращения может отклониться от заданного значения.

Регулятор скорости получает сигнал от датчиков частоты вращения и сравнивает фактическое значение с заданием. При возникновении отклонения система формирует управляющее воздействие на топливные клапаны. Если нагрузка увеличивается, подача топлива при допустимых условиях повышается. При снижении нагрузки регулятор уменьшает топливоподачу, предотвращая ускорение ротора.

Однако регулирование частоты вращения не является единственной задачей. Вторым важнейшим параметром выступает температура газов в горячем тракте. Она непосредственно связана с тепловой нагрузкой на рабочие лопатки, сопловые аппараты, корпусные элементы и другие детали турбины. Превышение допустимого температурного уровня может ускорить термическое старение материалов, вызвать повреждение защитных покрытий и сократить ресурс оборудования.

Температурное регулирование может ограничивать подачу топлива независимо от запроса на увеличение мощности. В результате система действует по принципу приоритета наиболее строгого ограничения: если повышение нагрузки приводит к приближению температуры к допустимому пределу, дальнейшее увеличение топлива блокируется или ограничивается.

К числу контролируемых параметров также относятся давление и температура топлива, расход воздуха, давление за компрессором, параметры выхлопных газов и состояние смазочной системы. В зависимости от конструкции установки контролируются положения регулируемых направляющих аппаратов компрессора, перепады давления на фильтрах и другие характеристики газовоздушного тракта.

Для реализации этих функций применяются датчики, электронные контроллеры и исполнительные механизмы. Датчики преобразуют физические параметры в электрические сигналы, контроллер обрабатывает поступающую информацию, а исполнительные устройства изменяют положение клапанов и регулирующих механизмов. Важное значение имеет достоверность измерений: ошибка датчика температуры или частоты вращения может привести к неправильному управляющему воздействию.

Современные системы управления способны учитывать несколько ограничений одновременно. Это позволяет обеспечить более плавное изменение мощности и снизить вероятность перехода установки в нестабильный режим. При этом алгоритмы должны быть согласованы с аэродинамическими и тепловыми характеристиками конкретной модели турбины, поскольку универсальные настройки не могут полностью учитывать особенности всех типов агрегатов.

Регулирование топливоподачи и устойчивость газодинамического процесса

Топливная система является одним из основных исполнительных звеньев регулирования газотурбинной установки. Через неё обеспечивается поступление необходимого количества топлива в камеру сгорания. В зависимости от конструкции агрегата применяются газообразные или жидкие виды топлива, а некоторые установки предусматривают возможность работы на нескольких видах топлива.

При использовании природного газа система включает оборудование подготовки и регулирования давления, запорные и регулирующие клапаны, фильтры, измерительные приборы и элементы контроля герметичности. Для жидкого топлива предусматриваются насосы, фильтры, форсунки, регулирующая арматура и устройства контроля подачи. Конкретная схема зависит от характеристик топлива, давления в системе и требований изготовителя.

Управление топливоподачей должно учитывать не только требуемую мощность, но и условия устойчивого горения. Недостаточная подача топлива может привести к снижению температуры газов, потере мощности или погасанию пламени. Чрезмерная подача способна вызвать перегрев горячего тракта, нарушение состава топливовоздушной смеси и увеличение выбросов загрязняющих веществ.

Особую сложность представляет работа камеры сгорания при изменении нагрузки. В отдельных режимах меняются расход воздуха, давление и температурное состояние газов, поэтому условия стабилизации пламени также изменяются. Система управления должна обеспечивать допустимое соотношение топлива и воздуха, сохраняя устойчивость горения в предусмотренном диапазоне режимов.

В современных установках применяются электронные регуляторы топливных клапанов. Они получают задания от основного контроллера и изменяют положение исполнительных механизмов в соответствии с алгоритмом регулирования. Для повышения надёжности могут использоваться датчики положения клапанов, контроль давления до и после регулирующей арматуры и диагностика отклонений фактического положения от заданного.

При работе на газообразном топливе большое значение имеет контроль давления и качества поступающего газа. Изменение его состава и теплоты сгорания может влиять на характеристики горения и тепловую нагрузку турбины. Поэтому некоторые системы управления предусматривают дополнительные корректирующие функции, позволяющие адаптировать подачу топлива к изменяющимся условиям.

Не менее важным является предотвращение несанкционированного поступления топлива в камеру сгорания. Для этого предусматриваются запорные клапаны, контроль их положения и логические блокировки. При аварийном сигнале система должна обеспечить прекращение подачи топлива в соответствии с предусмотренной схемой останова. Подобные решения являются важной частью общей системы безопасности газотурбинного оборудования.

Регулирование компрессора и температурного состояния турбины

Компрессор обеспечивает подачу воздуха в камеру сгорания и создаёт необходимые условия для работы газотурбинного цикла. Его характеристики существенно влияют на мощность, экономичность и устойчивость всей установки. Изменение частоты вращения, температуры окружающего воздуха и нагрузки может приводить к изменению расхода воздуха и параметров сжатия.

Одним из наиболее опасных явлений в компрессоре является помпаж. Он связан с нарушением устойчивого течения воздуха через компрессор и может сопровождаться резкими колебаниями давления, изменением направления потока, повышенными вибрациями и значительными механическими нагрузками. Развитие такого режима способно привести к повреждению лопаточного аппарата и других элементов установки.

Для предотвращения подобных явлений применяются регулируемые направляющие аппараты, перепускные клапаны и специальные алгоритмы управления. Изменение положения направляющих аппаратов позволяет адаптировать характеристики компрессора к текущему режиму. В переходных процессах могут использоваться системы перепуска воздуха, уменьшающие вероятность работы в неустойчивой области.

Температурное регулирование связано с защитой деталей горячего тракта от чрезмерной тепловой нагрузки. Температура газов контролируется с помощью специальных термопар или других датчиков, размещённых в предусмотренных конструкцией точках. Полученные сигналы используются для ограничения

подачи топлива и формирования предупредительных сигналов при приближении к установленным пределам.

При этом следует учитывать, что температура газового потока не всегда полностью отражает температуру отдельных деталей. Лопатки, диски и корпусные элементы обладают различной тепловой инерцией, а локальные температурные условия могут отличаться от средних измеряемых значений. Поэтому при разработке системы управления используются расчётные характеристики, результаты испытаний и рекомендации изготовителя.

Для повышения эффективности установки применяются также системы управления охлаждением горячих деталей. В зависимости от конструкции турбины используются внутренние каналы охлаждения, защитные покрытия и специальные схемы подачи воздуха. Система управления должна обеспечивать работу этих механизмов в соответствии с предусмотренными режимами.

Регулирование компрессора и температурного состояния турбины тесно связано с топливной системой. Повышение подачи топлива без учёта воздушного режима может вызвать перегрев или нарушение устойчивости горения. Следовательно, контроллер должен согласовывать команды различным исполнительным механизмам, обеспечивая безопасное изменение режима всей газотурбинной установки.

Пусковые устройства и подготовка агрегата к запуску

Пуск газотурбинной установки является сложным переходным процессом, в ходе которого необходимо привести ротор в движение, обеспечить подачу воздуха, подготовить камеру сгорания, сформировать устойчивое пламя и вывести агрегат на самостоятельную работу. В отличие от обычного включения электродвигателя, запуск турбины требует согласованной работы большого количества вспомогательных систем.

Пусковое устройство предназначено для первоначального вращения ротора и обеспечения условий, при которых компрессор сможет создать необходимый воздушный поток. В зависимости от мощности и конструктивной схемы установки применяются электрические пусковые двигатели, гидравлические устройства, пневматические стартеры или генератор, работающий в пусковом режиме через преобразователь частоты.

Электрический стартер получает питание от соответствующей системы электроснабжения и через редуктор или другую передачу приводит ротор во вращение. Его мощность и характеристики должны соответствовать требованиям ускорения агрегата. Пневматические пусковые устройства используют энергию сжатого воздуха или газа и применяются в конструкциях, где такой способ запуска предусмотрен изготовителем.

Перед началом запуска должны быть подготовлены вспомогательные системы. В первую очередь проверяется наличие и достаточное давление смазочного масла, готовность системы охлаждения, состояние топливного оборудования, исправность средств контроля и отсутствие запрещающих сигналов. Если установка имеет систему проворачивания ротора, выполняются предусмотренные операции для проверки свободного вращения и равномерности состояния агрегата.

Особое значение имеет предпусковая вентиляция газовоздушного тракта. Она предназначена для удаления возможных скоплений горючих паров или газа перед подачей топлива и включением зажигания. Необходимая продолжительность и условия продувки определяются конструкцией установки, характеристиками топливной системы и требованиями применимых стандартов.

Только после подтверждения готовности всех необходимых систем автоматика разрешает переход к следующей стадии. Если хотя бы один из критически важных параметров не соответствует установленным условиям, запуск должен быть заблокирован. Такой подход предотвращает попытки пуска при недостаточном давлении масла, неисправности системы зажигания или наличии опасных условий в камере сгорания.

Заключение

Регулирование газотурбинных установок представляет собой комплекс взаимосвязанных технических и автоматизированных процессов, обеспечивающих устойчивую, экономичную и безопасную работу энергетического оборудования. Основными задачами системы управления являются поддержание требуемой частоты вращения, регулирование подачи топлива, ограничение температуры газов и обеспечение устойчивости компрессорного и турбинного трактов. Особое значение имеют пусковые устройства, поскольку правильная последовательность подготовки оборудования, продувки, зажигания и разгона определяет безопасность запуска. Защитная автоматика предотвращает развитие опасных режимов, связанных с превышением скорости, перегревом, потерей пламени, снижением давления масла и повышенной вибрацией. Дальнейшее совершенствование газотурбинных установок связано с развитием цифрового управления, диагностических систем и независимых защитных каналов. При этом надёжность агрегата определяется не только уровнем автоматизации, но и качеством проектирования, технического обслуживания и подготовки персонала.

Список литературы

1. International Organization for Standardization. *ISO 21789:2022. Gas turbine applications — Safety*. Geneva: ISO, 2022. Международный стандарт по безопасности газотурбинных установок.

2. International Organization for Standardization. *ISO 19859:2016. Gas turbine applications — Requirements for power generation*. Geneva: ISO, 2016. Стандарт требований к энергетическим газотурбинным установкам.
3. Boyce M. P. *Gas Turbine Engineering Handbook*. 4th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2012.
4. Saravanamuttoo H. I. H., Rogers G. F. C., Cohen H., Straznicky P. V. *Gas Turbine Theory*. 7th ed. Harlow: Pearson, 2017.
5. Walsh P. P., Fletcher P. *Gas Turbine Performance*. 2nd ed. Oxford: Blackwell Science, 2004.
6. International Electrotechnical Commission. *IEC 61508: Functional Safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic Safety-related Systems*. Geneva: IEC, 2010.
7. International Electrotechnical Commission. *IEC 61511-1:2016. Functional Safety — Safety Instrumented Systems for the Process Industry Sector*. Geneva: IEC, 2016.
8. American Petroleum Institute. *API Standard 616. Gas Turbines for the Petroleum, Chemical, and Gas Industry Services*. Washington: API.
9. Lefebvre A. H., Ballal D. R. *Gas Turbine Combustion: Alternative Fuels and Emissions*. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2010.
10. Meher-Homji C. B., Chaker M. A., Motiwala H. M. Gas turbine performance deterioration. *Proceedings of the 30th Turbomachinery Symposium*. Texas A&M University, 2001.