

УДК 681.122: 221.311

Тонконогий Ю., Пядишюс А., Станкявичюс А., Тонконоговас А.

Литовский энергетический институт

ВЛИЯНИЕ ПУЛЬСАЦИЙ ПОТОКА ГАЗА НА РАБОТУ НЕБОЛЬШОЙ ТЕПЛОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Досліджено вплив пульсацій потоку газу, вироблених поршневим компресором, на облік споживання газу і вібрацію устаткування теплової електростанції, що працює по парогазовому циклу.

Исследовано влияние пульсаций потока газа, производимых поршневым компрессором, на учет потребления газа и вибрацию оборудования тепловой электростанции, работающей по парогазовому циклу.

The effect of the gas flow pulsations produced by a reciprocating compressor, on account of consumed gas and vibration of equipment of a heat power station that operates by combined cycle is investigated.

p – давление;

Δp – амплитуда пульсации давления;

f – частота пульсации;

t – время;

ω – частота вращения ТСГ;

ТСГ – турбинный счетчик газа;

ГИС – газоизмерительная станция.

Индексы:

рез – резонанс;

пр – предельный;

ср – средний.

Введение

В одном из городов Литвы недавно введена в эксплуатацию когенерационная тепловая электростанция (ТЭС) мощностью 30 МВт, работающая по комбинированному парогазовому циклу. Сразу после пуска ТЭС обнаружилось проблемы измерения потребляемого газа, осуществляемого ТСГ, который является типичным средством учета при средних размерах потребления газа. Регистрируемое количество газа значительно превышало истинное (в среднем до 10 %, а при малых нагрузках и более).

ТЭС такого типа характеризует высокая энергоэффективность (к.п.д. выработки электричества доходит до 55 % и выше при одновременной выработке тепла без дополнительных затрат топлива), что делает целесообразным широкое их внедрение. При этом важно изучить недостатки пилотной станции для их избежания в будущем.

Было предположено, что главной причиной большой погрешности измерения расхода газа является воздействие на ТСГ пульсации потока, создаваемой установленным в системе газоснабжения ТЭС поршневым компрессором.

Известно [1-5], что при использовании ТСГ в пульсирующем потоке из-за инерции ротора возникает всегда положительная динамическая погрешность. С увеличением частоты пульсации она растет до определенного предела, по достижении которого остается постоянной. Наиболее сильно влияние амплитуды пульсации расхода, при больших значениях которой погрешность может достигать десятков процентов. Погрешность также зависит от показателя инерции ТСГ и закона пульсации. Как пример, на рис. 1 по данным [5] представлена зависимость динамической погрешности ТСГ типа MZ100 для приведенного на том же рисунке закона пульсации.

Проведенные исследования были направлены на проверку высказанного предположения и на изучение влияния пульсации потока газа на работу ТЭС.

Система газоснабжения станции

Газ на ТЭС поступает из магистральной газоизмерительной станции (ГИС) через магистральный трубопровод (МТ) диаметром 200 мм и длиной приблизительно 2 км. В 300 м

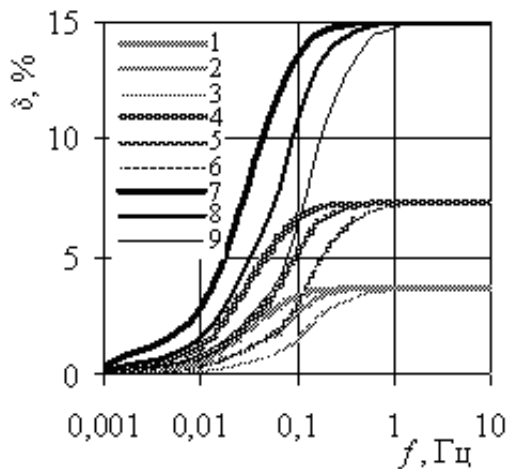


Рис. 1. Зависимость динамической погрешности ТСГ MZ100 от частоты пульсации: 1, 2, 3 – расход воздуха 100, 200, 400 м³/ч соответственно, относительная амплитуда пульсации расхода $\Delta\bar{Q} = 0,25$; 4, 5, 6 и 7, 8, 9 – те же расходы и амплитуда $\Delta\bar{Q} = 0,35$ и $0,5$ соответственно.

от ТЭС имеется отвод от МТ на городскую ГИС. Из МТ газ поступает в узел учета ТЭС. Учет газа осуществляется ТСГ типа SM-RI-XL, $Q_{\max} = 1000$ м³/ч, производства компании INSTROMET (Бельгия). Далее газ поступает в компрессор, повышающий давление от предельной в черте города по техническим соображениям величины 15 бар до 25 бар – давления, при котором газ должен подаваться в газотурбинную установку. Установлен одноцилиндровый поршневой компрессор двойного действия типа B181 130 N2,5 производства компании LMF AG (Австрия), мощность привода 300 кВт. На входе и выходе компрессора имеются демпферы пульсаций объемного типа цилиндрической формы с двумя полусферическими крышками, объем каждого 0,36 м³.

Измерения

В процессе исследования измерялось распределение во времени давления потока газа в ТСГ и частоты вращения ТСГ, а также частота оборотов кривошипа компрессора. Давление измерялось пьезокерамическим датчиком с разрешающей способностью по давлению до до-

лей Па и по времени до 60 мс. Частота вращения ТСГ определялась по времени прохождения лопаток турбины ТСГ мимо входящего в состав ТСГ высокочастотного импульсного датчика. Выходные сигналы датчиков преобразовывались высокоскоростным 16-разрядным АЦП. Давление газа определялось по измеренному выходному напряжению датчика давления с учетом его калибровки. Частота пульсации давления и частота вращения ТСГ определялись путем обработки зависимости этих параметров от времени.

Погрешность ТСГ определялась по показаниям контрольного счетчика Кориолиса.

По результатам I-го этапа проведенных исследований фирма-изготовитель компрессора предложила для устранения выявленных недостатков и улучшения качества демпфирования пульсаций установить перед входным демпфером компрессора диафрагму диаметром 150/85 мм и реализовала свое предложение. После этого состоялся II-ой этап измерений.

Анализ изменения во времени давления газа и частоты вращения ТСГ

На рис. 2 представлено изменение во времени частоты вращения ТСГ и давления газа в счетчике (до установки диафрагмы) в зависимости от нагрузки ТЭС. Нетрудно видеть хорошую корреляцию между обеими кривыми.

При всех нагрузках наблюдаются сильные пульсации обоих параметров. При этом на пульсацию с самой большой амплитудой (1-ю гармонику) накладываются пульсации более

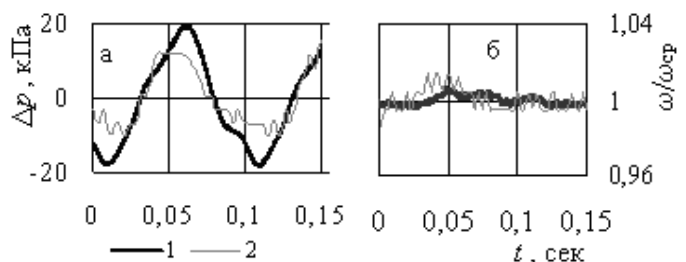


Рис. 2. Изменение во времени частоты вращения ротора ТСГ (1) и давления газа (2); а, б – нагрузка ТЭС 16, 30 МВт соответственно.

высоких гармоник (прежде всего 2-й), значительно большей частоты и гораздо меньшей амплитуды.

На рис. 3 представлена зависимость от нагрузки ТЭС следующих параметров: частоты и амплитуды пульсации давления, частоты пульсации оборотов ТСГ, частоты вращения компрессора.

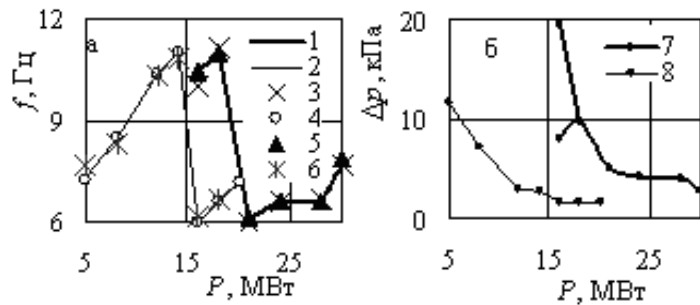


Рис. 3. Зависимость параметров пульсации от нагрузки ТЭС. 1, 3, 5 – частоты соответственно пульсации давления, пульсации оборотов ТСГ, вращения компрессора до установки диафрагмы; 2, 4, 6, те же частоты после установки диафрагмы; 7, 8 – амплитуда пульсации давления до и после установки диафрагмы.

Кривые всех частот совпадают в пределах точности измерений, из чего однозначно следует, что источником пульсаций является компрессор. Этот вывод соответствует основным положениям [6, 7].

Характер изменения частоты пульсаций обусловлен особенностью регулирования работы компрессора, которое осуществляется двумя способами:

- при повышенных нагрузках – изменением частоты вращения кривошипа компрессора;
- при сниженных нагрузках – дополнительно изменением цикла работы клапанов компрессора, когда при обратном ходе поршня поступление газа в турбину перекрывается.

Соответственно при снижении нагрузки ТЭС от номинальной (30 MWt) частота вращения компрессора и соответственно частота

пульсации сначала несколько уменьшается, но ниже 18 MWt начинают резко расти до величины 11 Гц. При увеличении эти частоты проходят через значение резонансной частоты системы, составляющее по нашим оценкам величину 9 Гц. При этом возникает резонанс, и резко возрастает амплитуда пульсаций.

После установки на входе в компрессор диафрагмы диаметром 80 мм качество демпфирования пульсаций несколько улучшилось. При этом кривые зависимости частоты и амплитуды пульсаций сместились влево, резонансная частота и амплитуда пульсации давления немного уменьшились, однако общая картина процессов осталась неизменной, и резонанс не был устранен.

Возникновение резонанса

Резонанс возникает всякий раз, когда изменяющаяся в процессе регулирования работы компрессора фактическая частота пульсаций становится равной или близкой к резонансной частоте системы.

Схема возникновения резонанса показана на рис. 4. Кривая рабочей частоты пересекает линию резонансной частоты в нескольких точках, и во всех них следует ожидать появления

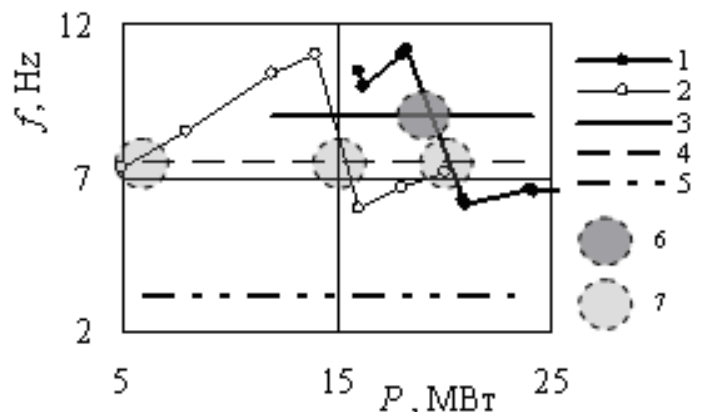


Рис. 4. Возникновение резонанса. Частота пульсаций (1 и 2), резонансная частота (3 и 4) и зоны резонанса (6 и 7) до и после установки диафрагмы; 5 – расчетная резонансная частота при хорошем качестве демпфирования.

резонанса. Резонанс сопровождается резким повышением амплитуды пульсаций и сильной, ощутимой на слух и на ощупь вибрацией трубопровода, могущей привести к его разрушению.

Погрешность ТСГ. Ударная нагрузка на подшипники ТСГ

На рис. 5 представлена зависимость погрешности ТСГ от нагрузки ТЭС. Характер этой зависимости и зависимости амплитуды пульсации давления от нагрузки очень похожи, т.к. именно повышенная пульсация является причиной повышенной погрешности.

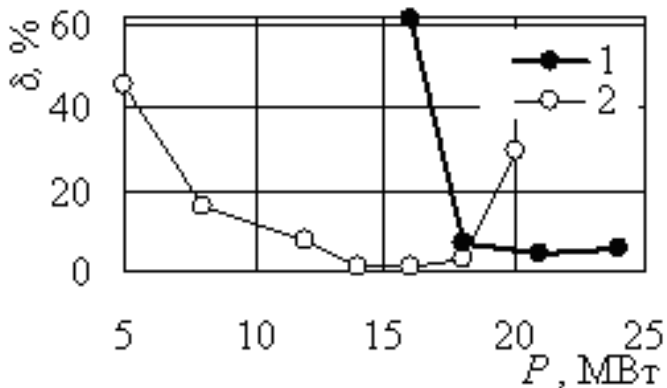


Рис. 5. Зависимость погрешности ТСГ от нагрузки ТЭС до (1) и после (2) установки диафрагмы.

При всех нагрузках погрешность положительна. При уменьшении нагрузки ниже 18 МВт погрешность ТСГ резко возрастает до величины + 62 %. При нагрузках выше 18 МВт значения погрешности не превышают величины + 5 % и по большей части примерно равны +2 %. Установка диафрагмы не решает проблему до конца (об этом см. ниже).

Существует еще одно неприятное последствие пульсаций. Многократное изменение давления с большой скоростью и с высокой частотой создает опасную знакопеременную ударную нагрузку на важнейшие детали ТСГ — подшипники, редуктор и лопатки турбины. Здесь наиболее слабое звено — основные подшипники ротора. Расчет средней скорости изменения давления dp/dt по данным наших

измерений дает следующие результаты. При резонансной частоте $f_{рез} = 9$ Гц наибольшая амплитуда пульсации давления $\Delta p_{макс} = \pm 20$ кПа. Тогда $(dp/dt)_{макс} = 720$ кПа/сек (7,2 бар/сек), что в двадцать раз превышает предельно допустимую европейским стандартом [8] скорость $(dp/dt)_{пр} = 0,35$ бар/сек. ТСГ не имеет шансов противостоять такой нагрузке.

Распространение пульсаций за пределы ТЭС. Отклик ТСГ на пульсацию потока при нулевом результирующем расходе

Для выяснения вопроса о распространении пульсаций за пределы ТЭС были проведены измерения на ГИС МТ, из которой на ТЭС подается газ, а также на городской ГИС, находящейся на одной с ТЭС ветке МТ. На ГИС МТ измерения проводились непосредственно за регулятором давления, который снижает давление до 15 бар, на городской ГИС — в районе ТСГ, который учитывает подаваемый в город газ. Вход счетчика был открыт и соединен с трубопроводом подачи газа на ТЭС. Выход ТСГ был перекрыт шаровым вентилем, так что результирующий поток газа через счетчик был равен нулю. Регистрировалось изменение во времени давления и показаний этого счетчика. Измерения были проведены при нагрузке ТЭС примерно 16 МВт, т.е. в режиме сильного резонанса.

Частота пульсаций давления на городской ГИС (1) и ГИС МТ (2) представлена на рис. 6, а, показания ТСГ городской ГИС — на рис. 6, б.

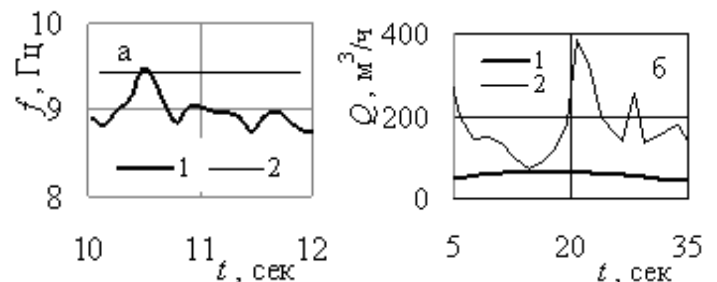


Рис. 6. Изменение во времени частоты пульсации давления (а) и показаний ТСГ городской ГИС (б) до установки диафрагмы.

Частоты пульсаций давления на магистральной ГИС МТ и на городской ГИС примерно совпадают друг с другом, отличаясь только за счет некоторой нестабильности нагрузки ТЭС. Они также совпадают с частотой пульсаций на ТЭС. Наибольшие наблюдаемые на обеих ГИС значения амплитуды пульсации давления достигали величины $\pm (10...12)$ кПа. При этом наблюдались сильные вибрации газопроводов и оборудования обеих ГИС.

Т.о., возникающие на ТЭС пульсации потока газа распространяются по трубопроводу далеко за пределы ТЭС, вызывая резонанс и создавая опасность разрушения оборудования.

Распространение пульсаций искажает учет газа на находящейся на одной с ТЭС ветке газопровода городской ГИС. При нулевом результирующем потоке газа через ТСГ показания ТСГ заметно выше нуля. Это связано с особенностями конструкции датчика, устанавливаемого в настоящее время на большинстве ТСГ. Датчик регистрирует прохождение лопаток турбины, но не учитывает направление их движения. Электронный прибор пересчета объема газа суммирует все импульсы из датчика в один регистр и тем самым при пульсациях фиксирует «мнимый» расход и объем газа. Результаты моделирования поведения ТСГ в пульсирующем потоке газа при нулевом суммарном расходе, представленные на рис. 7, подтверждают этот факт.

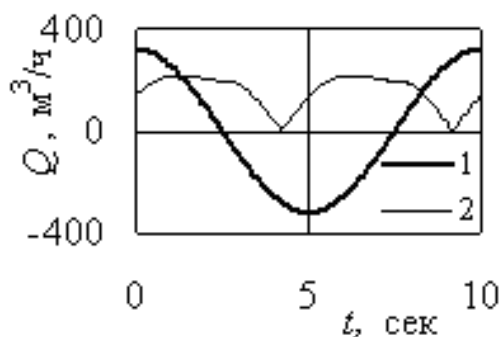


Рис. 7. Отклик ТСГ на пульсацию потока при нулевом результирующем расходе. 1 – расход; 2 – показания ТСГ.

Оценка принятых фирмой-изготовителем компрессора мер по улучшению качества демпфирования

Установка диафрагмы на входе компрессора привела к сдвигу кривой частоты влево. По-прежнему частота пульсаций совпадает с кривой изменения частоты вращения компрессора. Немного уменьшилась резонансная частота (от 9 до 7 Гц) и амплитуда пульсаций давления системы газоснабжения ТЭС (от 20 до 12 кПа при резонансе). Однако резонанс и повышенные пульсации не устранены. Существенно снизился уровень динамической погрешности, однако он все еще превышает допустимые значения. По-прежнему пульсации от компрессора распространяются за пределы ТЭС, вызывая вибрацию и влияя на точность учета и на техническое состояние ТСГ городской ГИС. Установка диафрагмы – шаг в верном направлении, но недостаточный.

Рекомендации по коренному устранению выявленных недостатков

Для полного избежания вибраций трубопровода газа и существенного снижения интенсивности пульсаций потока надо уменьшить резонансную частоту ниже наименьшего значения частоты вращения компрессора. Для этого надо усовершенствовать устройство подавления пульсаций, увеличивая его объем и/или гидравлическое сопротивление. В частности, следует оснастить вход и выход компрессора двухкамерным демпфером пульсаций. Как показывают расчеты, если существующую камеру дополнить второй камерой такого же объема и соединить их трубой длиной 2 м и диаметром 0,04 м, резонансная частота уменьшится до значения 3,1 Гц – ниже минимальной рабочей частоты вращения компрессора. Также следует изменить принцип регулировки компрессора и при пониженных нагрузках во время обратного хода поршня газ направлять не назад во вход компрессора, а в специальный промежуточный демпферный объем.

При наличии нормативно-технической возможности следует отказаться от использования

компрессора, транспортируя газ на ТЭС при давлении подачи в газовую турбину (в данном случае для турбины СИММЕНС это 25 бар).

При отсутствии такой возможности следует вместо поршневого использовать компрессор, создающий пульсации меньшей интенсивности, например, винтовой.

Во всех случаях следует контролировать уровень пульсаций, обеспечивая применением надлежащей системы демпфирования их снижение до приемлемого уровня по условиям точности учета газа и отсутствия вибраций [1,6].

Выводы

1. Причиной повышенной положительной погрешности измерения расхода газа является воздействие создаваемых поршневым компрессором пульсаций потока газа на ТСГ.

2. Существующая система подавления пульсаций не отвечает требованиям международных стандартов и должна быть усовершенствована.

3. Особую опасность создают резонансные явления, возникающие из-за неудачного сочетания рабочей частоты вращения компрессора и резонансной частоты. Они вызывают резкое повышение интенсивности пульсаций, резкое повышение погрешности измерения ТСГ и опасные вибрации оборудования.

4. Пульсации распространяются далеко за пределы ТЭС, неся с собой вышеуказанные неприятные последствия.

5. Рекомендован комплекс мер по контролю пульсаций и их снижение до приемлемого

уровня по условиям точности учета газа и отсутствия вибраций.

ЛИТЕРАТУРА

1. *ISO/TR 3313:1998*. Measurement of fluid flow in closed conduits – Guidelines on the effects of flow pulsations on flow-measurement instruments.

2. *Atkinson K.N.* A software tool to calculate the overregistration error of a turbine meter in pulsating flow // *Flow Meas. Instrum.* – 1992. – 3 No 3. – P. 167-172.

3. *Cheesewright R., Bisset D., Clark C.* Factors which influence the variability of turbine flow meter signal characteristics // *Flow Meas. Instrum.* – 1998. – 9 No 2. – P. 83-189.

4. *Lee W.F.Z., Kirik M.J., Millington B.* Gas turbine flow meter measurement in pulsating flow // *Eng. Power, Trans. ASME.* – 1975. – P. 31-539.

5. *Tonkonogij J., Pedišius A.* The errors of gas meters // *Measurement techniques*. ISSN 0543-1972. 2006. – Vol. 42. – No. 5. – P. 458-463.

6. *API STANDARD 618*. Reciprocating compressors for petroleum, chemical, and gas industry services. – Fourth edition. – 1995.

7. *Atkins K.E., Pyle A.S., Tyson J.D.* Understanding the pulsation & vibration control concepts in the new API 618 fifth edition. – Presented at the 2004 Gas Machinery Conference in Albuquerque, New Mexico, October 4-7. – 2004.

8. *Европейский стандарт EN 12261:2002*. Турбинные счетчики газа.

Получено 01.03.2010 г.