

- Н. С. Щербаков, А. А. Рябов, В. В. Шевчук, В. Н. Разношинский, И. Н. Тертышный, С. А. Прилипко // Пробл. машиностроения. – 2016. – Т.19, №4. – С.12–18.
3. *Вопросы* термодинамического анализа эффективности рабочего процесса дожимных газоперекачивающих агрегатов с газотурбинным приводом. Ч. I. / И. Н. Тертышный, С. А. Прилипко, Е. А. Мирошниченко, В. П. Парафейник // Пробл. машиностроения. – 2015. – Т.18, №4/1. – С.9–17.
 4. *Термодинамический* анализ эффективности центробежного компрессора как сложной энерготехнологической системы в составе агрегата типа ГПА-Ц-32П / И. Н. Тертышный, В. П. Парафейник, А. Н. Нефедов, С. А. Рогальский, Н. А. Котенко, Д. Н. Тимошадченко, С. А. Михайленко // 16 МНТК по компрессоростроению. – РЭП Холдинг, 2014. – Т. 1 – С.328–339.
 5. *Монтаж*, испытания и эксплуатация газоперекачивающих агрегатов в блочно-контейнерном исполнении / А. И. Апанасенко, Н. Г. Крившич, Н. Д. Федоренко. – Л.: Недра, 1991. – 361 с.
 6. *К вопросу* оптимизации геометрии проточной части центробежных компрессоров природного газа / В. П. Парафейник, А. Н. Нефедов, В. Е. Евдокимов, И. Н. Тертышный // Компрес. техника и пневматика. – 2012. – №2. – С.10–17.
 7. *Конвертирование* авиационных двигателей в стационарные газотурбинные установки / В. А. Коваль, В. В. Романов, Ю. М. Ануров и др. – Харьков: Монограф, 2010. – 244с.
 8. *Парафейник, В. П.* Термодинамический анализ эффективности газоперекачивающих агрегатов / В. П. Парафейник, В. Н. Довженко, В. А. Евтушенко // Компрес. техника и пневматика. – 1997. – Вып.3–4. – С.15–18.
 9. *Щуровский, В. А.* Газотурбинные газоперекачивающие агрегаты / В. А. Щуровский, Ю. А. Зайцев. – М.: Недра, 1994. – 192 с.

Поступила в редакцию 02.03.17

А. А. Тарелин, чл.-кор. НАН Украины
А. В. Нечаев
А. Е. Хиневич
 Институт проблем машиностроения
 им. А. Н. Подгорного НАН Украины,
 г. Харьков,
 e-mail: tarelin@ipmach.kharkov.ua

Ключові слова: парові турбіни, електризація вологої пари, електричні розряди, електромагнітні випромінювання.

УДК 621.165:537

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИЗЛУЧЕНИЯ В ВЫХЛОПНОЙ ЧАСТИ ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ

Подана інформація про електромагнітні випромінювання в зоні вихлопу турбіни, пов'язані з електризацією вологої пари. Наведені дані вимірів електромагнітного випромінювання за останнім ступенем турбіни. Описані ефекти впливу електромагнітних явищ на експериментальне електротехнічне устаткування, розміщене в конденсаторі турбіни. Обговорюються можливі механізми впливу електромагнітних випромінювань на ефективність і надійність турбоустановки.

Введение

Во влажнопаровой турбоустановке, начиная от зоны Вильсона и далее, до последних ступеней турбины, происходит электризация капельной влаги в потоке рабочего тела. Причины и механизмы электризации рассмотрены достаточно подробно в работе [1]. Одним из следствий электризации может являться возникновение электромагнитных излучений (ЭМИ) влажного пара в зоне последних ступеней и в выхлопном патрубке. Наиболее вероятные источники возникновения ЭМИ – импульсные токи, возникающие при: заряде-разряде капель воды, дроблении и слиянии заряженных капель, ударе заряженных капель по заземленным элементам проточной части, близком (порядка размера капли) пролете заряженной капли вблизи металлической поверхности, коронировании капель, электрических разрядах внутри влажнопарового потока и между паровым потоком и заземленными поверхностями.

В процессе специально проведенных экспериментальных исследований на турбине Т-37/50-8,8 было зафиксировано наличие ЭМИ в выхлопном патрубке влажно-паровой турбины [1].

В качестве приемника излучения использовались две включенные параллельно линейные антенны в виде стальных струн, подвешенных на изоляторах между стенками патрубка над трубным пучком на высоте 800 мм. Для измерения спектрального состава использовался анализатор спектра С4-59 с диапазоном измерений 10 – 110 МГц. Спектральный вид сигнала приведен на рис. 1.

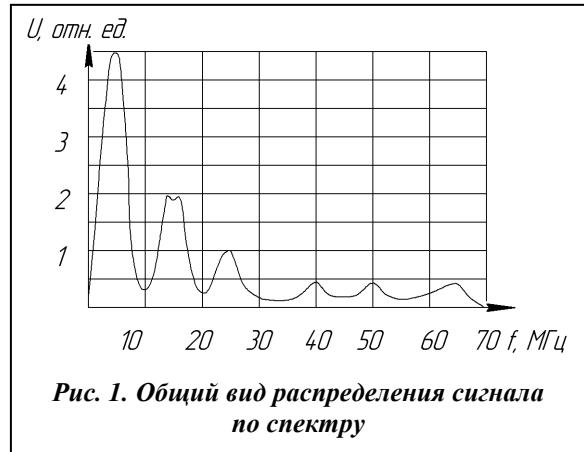
Для измерений в более высокочастотной области использовали анализатор спектра С4-27 с диапазоном измерений 0,01 – 40 ГГц. В результате было обнаружено излучение вблизи двух ГГц. Однако этот результат следует считать предварительным, поскольку используемая в эксперименте антенна обладала узкой полосой пропускания, а заряженный влажнопаровой поток сильно поглощает ЭМИ.

В целом измерения показали, что обнаруженное ЭМИ в патрубке влажно-паровой турбины имело шумовой характер. Регистрируемая амплитуда непрерывно изменялась в широких пределах в диапазоне частот от единиц кГц до единиц ГГц.

По предварительной оценке суммарная мощность излучения может достигать до десяти кВт. Излучение, поглощаясь в элементах конструкции конденсатора и в заряженном влажном паре, способно повышать их температуру и снижать эффективность работы конденсатора.

При проведении экспериментов также были обнаружены повреждения диэлектрических материалов в системе подвода ионизирующего напряжения установленной в конденсаторе турбины, обусловленные, по всей видимости, высокочастотными составляющими ЭМИ.

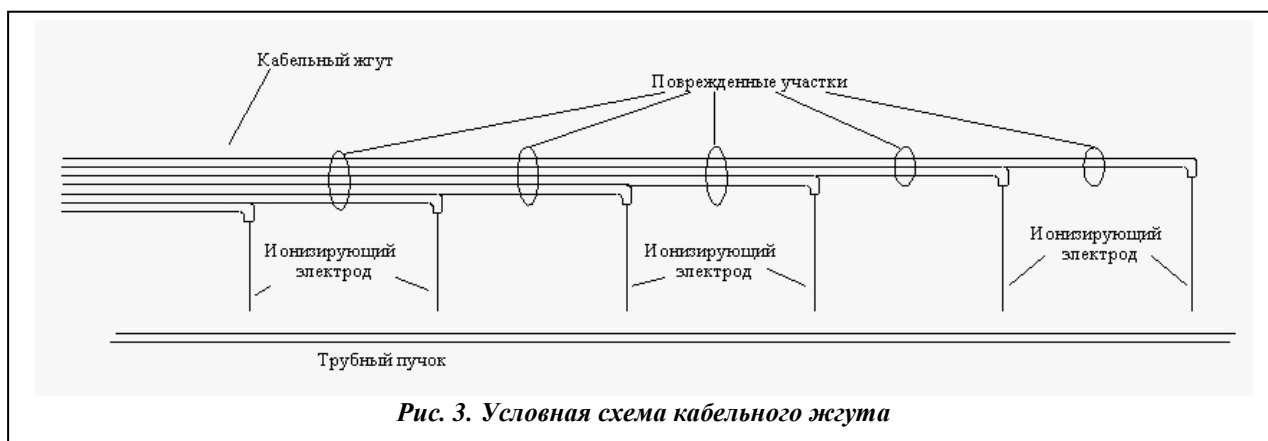
Для подвода высокого напряжения к игольчатым электродам над поверхностью трубных пучков конденсатора использовалась система из семи высоковольтных кабелей марки ПВВ, проложенных в стеклопластиковых трубах. Вид фрагмента системы приведен на рис. 2.



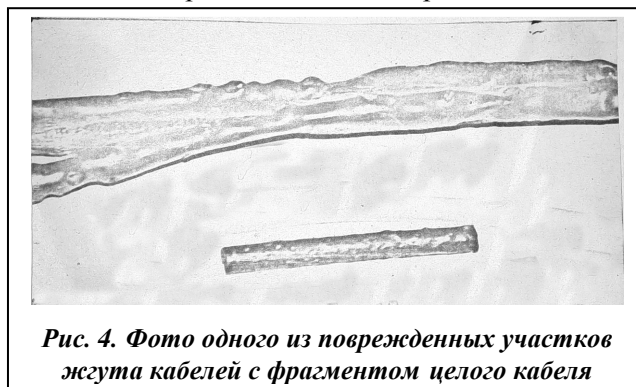
Каждый игольчатый электрод подключался к высокому напряжению индивидуальным кабелем, что позволяло избирательно создавать ионизацию пара над различными участками трубных пучков конденсатора. Длины кабелей, питающие игольчатые электроды, были от 2 до 7 м. Условная схема кабельного жгута с ионизирующими игольчатыми электродами показана на рис. 3.

После работы в конденсаторе на кабельных жгутах были обнаружены участки вскипания и обугливания изоляции, в которых изоляционная оболочка отдельных кабелей спекалась в одно целое (рис. 4). При этом стеклопластиковые трубы не имели видимых тепловых повреждений.

Участки спекания изоляции располагались периодически на расстоянии порядка 40–45 см. Эти повреждения внешне были похожи на воздействие электромагнитной стоячей волны. Принимая расстояние между повреждениями половине длины волны, можем оценить частотный диапазон – он соответствует электромагнитным волнам с частотами порядка сотен МГц. Однако при измерениях в



этой области частот значительного излучения обнаружено не было, так как исследования проводились на одном режиме. Поскольку спектр электромагнитных излучений существенно зависит от режимов работы турбоустановки, можно предположить, что на других режимах электромагнитное излучение может быть и в высокочастотной области. Подтверждением этого предположения являются приведенные в статье [2] результаты регистрации электромагнитного излучения ионизированного водяного пара. Авторы статьи проводят исследования влияния электромагнитных излучений атмосферных явлений на электронное оборудование авиационной техники. Для имитации грозовых разрядов используют стенд, в котором применяется наэлектризованная струя влажного водяного пара. Так же, как и в выхлопной части турбоустановки, в описанных в статье экспериментах объектом исследования был высокоскоростной (~ 400 м/с) заряженный влажный водяной пар с высокой плотностью объемного заряда ($10^{-4} \div 10^{-2}$ Кл/м³). Поскольку параметры заряженного аэрозоля в этих экспериментах сходны с параметрами заряженного пара за последней ступенью турбины (максимальная объемная плотность заряда $10^{-4} \div 10^{-3}$ Кл/м³), можно предполагать, что и разрядные явления, происходящие на стенде, сходны с явлениями за последней ступенью влажно-паровой турбины.



Как известно, разрядные процессы, связанные с заряженными аэрозольными облаками, бывают различных видов: между облаком и заземленным объектом и внутри облака. Причем внутриоблачные разряды наименее изучены и, как отмечают авторы статьи, имеют более высокочастотный диапазон излучения. За последней ступенью турбины, так же как и на описанном в статье стенде, реализуются условия для разрядов обоих видов.

Анализ спектра искрового излучения позволил выделить семь характерных частотных диапазонов: менее 1; 2–5; 6–10; 11–18; 19–30; 31–50; 51–150; 151–300 МГц, интенсивность которых зависит от формы разряда. Авторы отмечают, что для мощных разрядов облако аэрозоля – заземленный электрод наибольшая интенсивность излучения приходится на характерные частоты несколько сотен МГц. Этот частотный диапазон соответствует частотам, полученным по нашим оценкам выше, при рассмотрении возможности возникновения в кабеле стоячей электромагнитной волны. На рис. 5 показан спектр искрового разряда «аэрозольное облако – заземленный электрод». В этом спектре содержится и спектральная область излучения, зарегистрированная ранее в турбине (выделенный участок левее частоты 0,1 ГГц) и частоты, соответствующие стоячей электромагнитной волне в кабеле (около 300 МГц).

По всей видимости, сходный спектр излучения, включающий частоты до единиц ГГц, может быть и в выхлопном патрубке влажно-паровой турбины.

Для исследования качественной картины повреждения изоляции кабеля высокочастотным электромагнитным излучением был проведен опыт в СВЧ печи. Помещенный в СВЧ печь на 4 минуты отрезок высоковольтного кабеля ПВВ имел повреждения изоляции с периодичным расплавлением (рис. 6), качественно идентичные повреждениям кабеля в конденсаторе турбины. Отличие, естественно, было в периодичности зон повреждения, располагавшихся с периодом 45 мм, что соответствует гигагерцовой области частот излучения. (2,4 ГГц).

Причина оплавления изоляции состоит в возбуждении высокочастотной стоячей электромагнитной волны в проводнике кабеля.

Кроме оплавления изоляции кабелей, была обнаружена наводка высокого напряжения в коммутационной аппаратуре, вынесенной за пределы конденсатора. Для исследования зависимости заряженности потока влажного пара за последней ступенью турбины при выведении ее на рабочую мощность в выхлопном патрубке был установлен струнный электрод. Кабель от электрода был выведен в коммутатор на внешней стороне конденсатора. Коммутатор позволял подключать к электродному кабелю источник высокого напряжения. При работающей турбине неоднократно наблюдалось возникновение электрической дуги в разомкнутом коммутаторе между его контактами при выключенном высоковольтном источнике. Измерения возникающего на электроде напряжения показали, что оно имеет постоянную и переменную высокочастотную составляющие.

Выводы

В выхлопном патрубке влажно-паровой турбоустановки экспериментально обнаружены электромагнитные излучения шумового характера. Спектр излучений охватывает широкий диапазон – от сотен герц до единиц гигагерц. Суммарная мощность излучения может достигать значительной величины и зависит от режимов и мощности турбоустановки. Излучение может поглощаться ионизированным паром и поверхностями конденсатора, что способно приводить к повышению температуры и ухудшению эффективности работы конденсатора турбины. Кроме того, экспериментально обнаружено явление наведения в электроде, расположенном в выхлопном патрубке турбины, высокого напряжения и тока, имеющего высокочастотные составляющие, достаточного для зажигания дугового разряда в коммутационной аппаратуре. Эти обстоятельства необходимо учитывать при проведении экспериментальных исследований и размещении за последней ступенью различных зондов и измерительной аппаратуры.

Поскольку электромагнитное излучение за последней ступенью напрямую связано с электризацией и влажностью потока, его можно использовать для диагностики эти процессов.

Обнаруженные явления способны оказывать влияние на эффективность и надежность паровой турбоустановки, что обуславливает необходимость их дальнейшего изучения.

Литература

1. *Тарелин, А. А.* Паровые турбины: электрофизические явления и неравновесные процессы / А. А. Тарелин, В. П. Склярков. – СПб: Энерготех, 2012. – 292 с.
2. *Исследование* характеристик искрового разряда между искусственным облаком заряженного водного аэрозоля и землей / А. Г. Темников, А. В. Орлов, В. Н. Болотов, Ю. В. Ткач // Инж.-физ. журн. – 2005. – Т. 75, № 7. – С. 52–59.

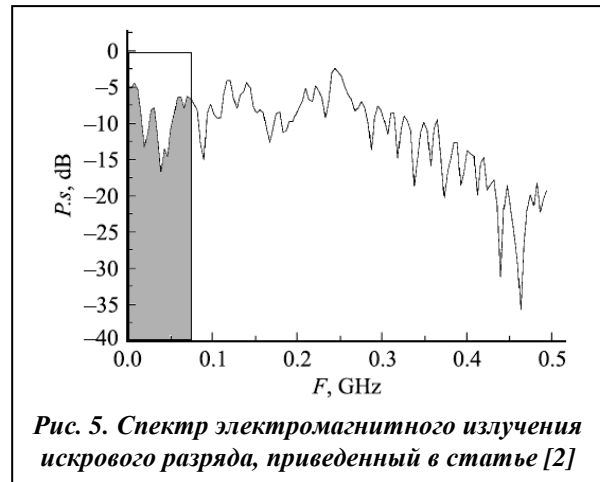


Рис. 5. Спектр электромагнитного излучения искрового разряда, приведенный в статье [2]



Рис. 6. Фото кабеля, подвергнутого излучению в СВЧ печи

Поступила в редакцию 14.03.17