

М.М. ХАФИЗОВ, студент гр. ЭП-1-24 (КГЭУ)
Научный руководитель Е.В. КЛЕЙН, преподаватель (КГЭУ)
г. Казань

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РОТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА НА УСТОЙЧИВОСТЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Современные энергосистемы функционируют в условиях возрастающих нагрузок и сложных режимов работы, что актуализирует задачи обеспечения их устойчивости. Особое значение приобретает анализ электромеханических взаимодействий в турбогенераторах - основных преобразователей механической энергии в электрическую. Традиционный подход к исследованию устойчивости, фокусирующийся исключительно на электромагнитных процессах, не учитывает существенного влияния механической динамики роторного узла [1].

Ротор турбогенератора представляет собой сложную колебательную систему, подверженную действию гироскопических эффектов. При определенных условиях, в частности при совпадении рабочей скорости с критическими частотами, возникают резонансные явления, способные вызвать значительные вибрации [2]. Важно отметить, что положение критических частот не является фиксированным и зависит от гироскопического момента, определяемого типом прецессии ротора [3].

Современные подходы к моделированию роторной динамики. Для анализа колебаний роторных систем применяется модифицированная модель, учитывающая компоненты гироскопического момента и угловой инерции диска. Математическая интерпретация системы описывает движение ротора через баланс сил инерции, демпфирования и упругости, где гироскопический эффект проявляется как дополнительная сила, зависящая от скорости вращения и параметров прецессии [4].

Особенностью решения данной системы является расщепление критических частот на составляющие прямой и обратной прецессии, что существенно влияет на динамический отклик системы. При прямой прецессии направление вращения ротора совпадает с направлением волны изгиба, тогда как при обратной прецессии эти направления противоположны [5].

Механизм трансформации механических колебаний в электрические. Колебания ротора непосредственно влияют на рабочий зазор синхронного генератора, вызывая модуляцию магнитного сопротивления и возникновение дополнительных гармоник в магнитном поле. Это приводит к генерации переменных составляющих электромагнитного момента, что в соот-

ветствии с фундаментальными уравнениями машиностроения вызывает колебания активной и реактивной мощности, выдаваемой в сеть [6].

Физически этот процесс можно описать как преобразование механических вибраций в модуляцию магнитного потока, которая, в свою очередь, индуцирует колебания электрических параметров на выходе генератора.

Экспериментальная установка и параметры исследования Для верификации теоретических положений разработана комплексная модель, включающая подробное описание ротора с переменной жесткостью, систему возбуждения генератора и модель подключения к сети через преобразовательный комплекс.

Ключевые зависимости и закономерности Анализ переходных процессов показал следующие эффекты:

1. При прохождении зоны критических скоростей наблюдается рост амплитуды колебаний мощности до 15-20% от номинального значения.
2. Гироскопический эффект увеличивает расхождение между частотами прямой и обратной прецессии до 8-12%.
3. Колебания ротора с частотой 0.8-2.0 Гц вызывают низкочастотные колебания мощности, опасные для устойчивости энергосистемы [6].

Результаты исследования позволяют сформулировать следующие практические рекомендации:

1. Необходимость учета гироскопического эффекта при проектировании турбоагрегатов для рабочих скоростей выше первой критической.
2. Целесообразность мониторинга низкочастотных колебаний мощности как индикатора механических проблем ротора.
3. Важность корректировки настроек систем возбуждения и регуляторов мощности с учетом механических резонансных характеристик.

Проведенное исследование демонстрирует значимое влияние динамических параметров ротора на режимные характеристики энергосистемы. Установлено, что гироскопические эффекты и инерционные характеристики диска существенно модифицируют спектр критических частот, а механические колебания трансформируются в колебания электрической мощности. Полученные результаты обосновывают необходимость комплексного электромеханического подхода к проектированию и эксплуатации турбогенераторов.

Список литературы:

1. Кудрявцев, Е.М. Электромеханические переходные процессы в энергосистемах. – М.: Энергия, 2018.
2. Тимошенко, С.П., Янг, Д.Х. Колебания в инженерном деле. – М.: Лань, 2019.

3. Горячева, И.Г. Гироскопические эффекты в динамике роторов // Вестник МГТУ, 2020. – № 4. – С. 56-64.

4. Childs, D. Turbomachinery Rotordynamics. – Wiley, 1993.

5. Ананьев, В.А. Современные методы расчета критических скоростей вращения. – СПб: Политехника, 2017.

6. Мамиконянц, Л.Г. Взаимодействие электрических и механических колебаний // Электричество. – 2021. – № 2. – С. 34-41.

Информация об авторах:

Хафизов Марсель Марсович, студент гр. ЭП-1-24, КГЭУ, 420066, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51, marsfizof@gmail.com

Клейн Евгений Васильевич, преподаватель, КГЭУ, 420066, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51, LittledeathJack@yandex.ru