

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ЛИНЕАРИЗОВАННОЙ МОДЕЛИ КАЧАНИЙ

Ланбин Ю.В.¹

Научный руководитель – доктор ф. –м. наук, профессор Попов И. Ю.¹

¹Университет ИТМО

yury.lanbin00@gmail.com

Введение

Обеспечение динамической устойчивости электроэнергетических систем является одной из ключевых задач современной энергетики. Потеря синхронизма генераторов приводит к каскадным авариям и нарушению баланса мощности. Несмотря на широкое применение численных методов моделирования переходных процессов, аналитическое исследование устойчивости сохраняет самостоятельную ценность, поскольку позволяет выявить фундаментальные закономерности функционирования системы. Одним из базовых уравнений динамики синхронного генератора является уравнение качаний, описывающее эволюцию угла ротора относительно синхронно вращающегося поля [1]. Нелинейный характер зависимости электрической мощности от угла усложняет аналитический анализ, что обуславливает необходимость линеаризации и применения спектральных методов исследования.

Основная часть

В работе рассматривается динамическая модель синхронного генератора, подключённого к энергосистеме большой мощности. Поведение системы описывается уравнением качаний, отражающим баланс между механической мощностью, подводимой к валу турбины, и электрической мощностью, отдаваемой в сеть. Динамика определяется тремя ключевыми параметрами: приведённым моментом инерции ротора, коэффициентом демпфирования и характеристикой передаваемой электрической мощности, зависящей от угла ротора [2]. Стационарный режим работы генератора соответствует состоянию равновесия, при котором механическая и электрическая мощности совпадают. Для исследования устойчивости этого режима вводится малое возмущение угла ротора относительно равновесного значения. Поскольку зависимость электрической мощности от угла имеет нелинейный характер, применяется процедура линеаризации – разложение функции в окрестности точки равновесия с сохранением только первых членов разложения [3]. В результате исходная нелинейная модель сводится к линейному дифференциальному уравнению второго порядка с постоянными коэффициентами. Коэффициенты полученной модели имеют ясную физическую интерпретацию: один параметр характеризует инерционные свойства системы, другой – уровень демпфирования, а третий – «жесткость» электромагнитной связи, определяемую рабочим углом генератора. Для дальнейшего анализа система приводится к форме системы дифференциальных уравнений первого порядка, что позволяет представить её динамику в матричном виде. Исследование устойчивости сводится к анализу спектра соответствующей матрицы. Поведение малых возмущений определяется собственными значениями этой матрицы: если их вещественные части отрицательны, отклонения со временем затухают; если хотя бы одно из собственных значений имеет положительную вещественную часть, возмущение возрастает, что приводит к потере синхронизма [4]. Анализ характеристического многочлена показывает, что асимптотическая устойчивость достигается при положительности параметров демпфирования и электромагнитной жесткости. Последнее условие связано с величиной рабочего угла генератора: устойчивость сохраняется лишь тогда, когда угол не превышает

критического значения, соответствующего границе физически допустимой передачи мощности. Таким образом, динамическая устойчивость энергосистемы напрямую определяется спектральными свойствами линеаризованного оператора. Полученный критерий позволяет установить связь между параметрами физической системы и математическими характеристиками соответствующей динамической модели.

Выводы

Спектральный анализ линеаризованной модели качаний позволяет получить строгий критерий динамической устойчивости электроэнергетической системы и установить его физическую интерпретацию [5]. Работа демонстрирует взаимосвязь нелинейной динамики, линейной алгебры и теории устойчивости, а также показывает, каким образом собственные значения матрицы системы отражают поведение реального энергетического объекта. Предложенный подход может быть расширен на многомашинные системы, где анализ устойчивости сводится к исследованию спектра матрицы более высокого порядка, что открывает перспективы дальнейших исследований в области математического моделирования энергетических сетей.

Литература

1. Setlak L. et al. Dynamic stability analysis of the aircraft electrical power system in the more electric aircraft concept //Scientific Reports. – 2024. – Т. 14. – №. 1. – С. 25521.
2. Deltuva R., Lukočius R., Otas K. Dynamic stability analysis of isolated power system //Applied Sciences. – 2022. – Т. 12. – №. 14. – С. 7220.
3. Iskakov A. B., Yadykin I. B. Lyapunov modal analysis and participation factors with applications to small-signal stability of power systems //arXiv preprint arXiv:1909.02227. – 2019.
4. Боргояков А. А. Анализ влияния синтетической инерции фотоэлектрических установок на динамическую устойчивость электроэнергетических систем //Бутаковские чтения: материалы II Всероссийской с международным участием молодежной конференции, 13-15 декабря 2022 г., Томск. – Томский политехнический университет, 2022.
5. Юсибов М. И. Виды устойчивости энергосистемы и методы их повышения //Вестник науки. – 2025. – Т. 4. – №. 5 (86). – С. 2163-2168.