

Д.Р. БОЙКИН, студент гр. Э-24 (АлтГТУ)
И.А. ПАВЛИЧЕНКО, аспирант (АлтГТУ)
Научный руководитель И.В. БЕЛИЦИН, к.т.н., доцент (АлтГТУ)
г. Барнаул

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ПРИ ИНТЕГРАЦИИ НОВЫХ ВИДОВ ГЕНЕРАЦИИ И НАГРУЗКИ

Введение : современная электроэнергетика переживает период фундаментальной трансформации, движимой трендами цифровизации. Традиционная централизованная система, построенная на крупных синхронных генераторах, замещается распределенной и гибридной архитектурой, где значительную долю занимают генерация на основе возобновляемых источников энергии и активные нагрузки [1]. Хотя это способствует решению экологических проблем, интеграция технологий, основанных на силовой электронике (инверторов), создает серьезные угрозы для статической и динамической устойчивости электроэнергетической системы.

Классические синхронные машины обладают значительной инерцией, обеспечивающей демпфирование колебаний и поддержание частоты при возмущениях. В отличие от них, новые нагрузки, такие как мощные зарядные станции постоянного тока для электромобилей, создают кратковременные, но значительные провалы напряжения и искажения формы кривой [2].

В этих условиях традиционные методы моделирования и анализа переходных процессов, ориентированные на синхронные машины, требуют пересмотра. Целью данной работы является комплексное моделирование и анализ ключевых переходных процессов в ЭЭС с высокой долей новых видов генерации и нагрузки для выявления новых рисков и определения направлений адаптации систем управления.

Особенности моделирования новых видов генерации и нагрузки состоят в том, что для адекватного анализа необходимо корректное математическое представление новых элементов ЭЭС.

Моделирование может проводиться на различных уровнях детализации.

Подробные модели (Detailed Model): учитывают динамику силовых ключей (IGBT) и систему ШИМ. Требуют малого шага интегрирования и применяются для анализа электромагнитных переходных процессов и гармоник.

Упрощенные модели (Average Model): заменяют инвертор управляемым источником тока/напряжения, что позволяет анализировать электро-механические переходные процессы с приемлемым временем расчета [3].

Модели с функциями grid-forming и grid-following: современные стандарты (например, IEEE 1547-2018) требуют от ВИЭ возможности участвовать в регулировании частоты и напряжения. Grid-forming инверторы способны задавать частоту и напряжение в сети (аналогично синхронному генератору), в то время как grid-following работают как источники тока, следующие за сетью.

Новые виды нагрузки: зарядные станции для электромобилей моделируются как мощные нелинейные нагрузки с быстродействующей системой управления, потребляющие большой ток в короткие промежутки времени; системы накопления энергии (СНЭ) могут работать как в режиме нагрузки (заряд), так и в режиме генерации (разряд).

Снижение инерции из-за вытеснения синхронных генераторов ВИЭ приводит к увеличению скорости изменения частоты после отключения крупной генерирующей единицы. Это может вызвать несрабатывание традиционной противоаварийной автоматики, рассчитанной на иные динамические характеристики.

На тестовой модели ЭЭС с долей ВИЭ 30% и 50% было проведено короткое замыкание с последующим отключением линии. Установлено, что в сценарии с 50% ВИЭ RoCoF превышает допустимые значения для стандартной частотной разгрузки, что приводит к каскадному развитию аварии. Система с 30% ВИЭ сохраняет устойчивость.

Инверторные генераторы, работающие в grid-following режиме, критичны к провалам напряжения. При глубоком снижении напряжения они могут отключаться по требованиям правил подключения (LVRT – Low Voltage Ride Through), что усугубляет дефицит мощности и может привести к лавине напряжения [4]. Моделирование лавины напряжения в распределительной сети с высокой плотностью СЭС показало, что последовательное отключение инверторов при провале напряжения приводит к полному обесточиванию района. Внедрение СНЭ с функцией grid-forming позволяет стабилизировать напряжение и предотвратить коллапс.

Концентрация большого числа инверторов в парке ВИЭ может приводить к возникновению непреднамеренных взаимодействий между ними и элементами сети, проявляющихся в виде колебаний на субсинхронных и сверхсинхронных частотах [5]. Анализ работы крупной ВЭС показал наличие устойчивых колебаний на частоте 15 Гц, вызванных взаимодействием системы управления инверторов с емкостным сопротивлением протяженной кабельной линии коллектора.

Массовое подключение сверхбыстрых зарядных станций создает резкие, значительные скачки потребляемой мощности, которые могут интер-

пре-тироваться системой как короткое замыкание, вызывая ложные срабатывания защит и значительные провалы напряжения. Моделирование подключения 10 зарядных станций мощностью 150 кВт каждая к узлу 10 кВ показало падение напряжения на 8%, что находится на границе допустимого по ГОСТ. Одновременное включение 15 станций приводит к срабатыванию защит.

Закключение: проведенное моделирование и анализ подтвердили, что интеграция новых видов генерации и нагрузки принципиально меняет характер переходных процессов в электроэнергетической системе.

Снижение инерции является системной проблемой, требующей внедрения систем синтезированной (виртуальной) инерции от СНЭ и пересмотра параметров противоаварийной автоматики.

"Хрупкость" инверторной генерации к провалам напряжения требует обязательной реализации и совершенствования алгоритмов LVRT и HVRT (High Voltage Ride Through).

Импульсный характер новых нагрузок требует модернизации распределительных сетей и внедрения систем мониторинга в реальном времени для предотвращения лавин напряжения.

Перспективным направлением дальнейших исследований является разработка интегрированных моделей "электромеханические + электромагнитные переходные процессы", позволяющих в одном вычислительном эксперименте анализировать медленную динамику частоты. Кроме того, необходима разработка адаптивных систем защиты и управления, использующих данные с PMU (Phasor Measurement Units) и способных в реальном времени противодействовать новым видам неустойчивости.

Список литературы:

1. Kundur, P., et al. Definition and Classification of Power System Stability Revisited & Extended // IEEE Transactions on Power Systems, 2020 [Электронный ресурс] – URL : https://pure.manchester.ac.uk/ws/portalfiles/portal/232486440/Definition_and_Classification_of_Power_System_Stability_Revisited_Extended_.pdf (дата обращения : 24.10.2025)
2. Milano, F., et al. Fundamentals and Challenges of Low-Inertia Systems // IEEE PES Technical Report, 2018. – URL: <http://faraday1.ucd.ie/archive/papers/lowinertia.pdf> (дата обращения: 24.10.2025).
3. CIGRE Technical Brochure 864 "Modelling and Dynamic Performance of Inverter-Based Generation in Power System Analysis and Design, 2021 [Электронный ресурс] – URL : <https://www.cbip.org/ExternalFile/Dynamic%20Performance%2015th%20February%202021.pdf> (дата обращения : 24.10.2025).

4. Vittal, V. The Impact of Renewable Resources on the Performance and Reliability of the Power System // IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2012 [Электронный ресурс] – URL : <https://www.nae.edu/File.aspx?id=18585> (дата обращения : 24.10.2025).

5. Subsynchronous resonances studies. Analyzing the risk of torsional oscillations on multi-mass generator rotor shafts, 2018 [Электронный ресурс] – URL : <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:da43c219e9f79d93b55bcdfb76f19846707d9d72/pti-psc-ssr-studies-datasheet-en.pdf> (дата обращения : 24.10.2025).

Информация об авторах:

Бойкин Дмитрий Романович, студент гр. Э-24, АлтГТУ, 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, д. 46, boykin.dmitriy.123@mail.ru

Павличенко Илья Александрович, аспирант, АлтГТУ, 656038, г. Барнаул, проспект Ленина, д. 46

Белицин Игорь Владимирович, к.т.н., доцент, АлтГТУ, 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, д. 46, epp@altgtu.ru