

5. De Souza S. N. M. et al. Technical potential of electricity production from municipal solid waste disposed in the biggest cities in Brazil: Landfill gas, biogas and thermal treatment // *Waste Management & Research*. – 2014. – Т. 32. – № 10. – С. 1015-1023.
6. Funari V. et al. Solid residues from Italian municipal solid waste incinerators: A source for «critical» raw materials // *Waste Management*. – 2015. – Т. 45. – С. 206-216.
7. Dong J. et al. Comparison of waste-to-energy technologies of gasification and incineration using life cycle assessment: Case studies in Finland, France and China // *Journal of Cleaner Production*. – 2018. – Т. 203. – С. 287-300.
8. Cimpan C. et al. Central sorting and recovery of MSW recyclable materials: A review of technological state-of-the-art, cases, practice and implications for materials recycling // *Journal of Environmental Management*. – 2015. – Т. 156. – С. 181-199.
9. Zaman A. U. A comprehensive review of the development of zero waste management: lessons learned and guidelines // *Journal of Cleaner Production*. – 2015. – Т. 91. – С. 12-25.

**ПРАКТИЧЕСКИЙ ОПЫТ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТОВ ПО ПОВЫШЕНИЮ НАДЁЖНОСТИ
И ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ЭНЕРГОСИСТЕМ ЗА СЧЁТ ПРИМЕНЕНИЯ СНЭ И СТАТКОМ**

Муравьев¹ Д.И., Лукутин² Б.В.

¹*ООО «Лаборатория преобразовательной техники» (ГК «Системотехника»),
г. Санкт-Петербург, Россия*

²*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия*

Нефтегазовый сектор (НГС) является одним из ключевых сегментов промышленности и экономики не только в России, но и в мире, так, доля НГС в структуре ВВП России во II квартале 2023 года составила 16,0 % [3]. Подобные показатели были достигнуты благодаря значительным достижениям в технологиях добычи, переработки нефти и газа, делая НГС, на данный момент, драйвером в экономическом росте России. Продолжение стратегии поступательного развития отечественного НГС невозможно без увеличения эффективности и надёжности систем электроснабжения этого сектора. Данные вопросы являются центральными на дискуссионных площадках нашей страны, к примеру, на Международной выставке «Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса» – «НЕФТЕГАЗ», а также на Петербургском международном газовом форуме, среди участников которых крупнейшие нефтегазовые организации России: ПАО «Газпром», ПАО «Газпром нефть», ПАО «ЛУКОЙЛ», ПАО «Нефтяная компания «Роснефть», ПАО «Сургутнефтегаз» и др. По мнению лидеров НГС системы электроснабжения НГС часто сталкиваются с провалами напряжения, резкопеременными набросами и спадами активной мощности, значительным уровнем нелинейных искажений в сети, а также значительным потреблением реактивной мощности. Подобные электротехнические проблемы приводят к простоям оборудования и потере производственных мощностей. Стоит отметить, что недостаточная эффективность использования электроэнергии в процессе добычи и переработки нефти и газа также приводит к неоптимальной работе бурового и вспомогательного оборудования, к примеру, систем управления.

Сегодня, для решения этих сложных технических вопросов важно внедрять экономически и технологически обоснованные комплексные энергетические решения, среди которых наиболее перспективными являются системы накопления электроэнергии (СНЭ), дополненные быстродействующими статическими компенсаторами реактивной мощности с функцией активного фильтра – СТАТКОМ. СНЭ, основанные на литиевых батарейных модулях или суперконденсаторах, позволяют не только сглаживать пики потребления электроэнергии, но и полноценно замещать топливную генерацию, оптимально загружать вращающиеся генераторные установки по удельному расходу натурального топлива, а также стабилизировать частоту в сети. В свою очередь СТАТКОМ способны мгновенно (до 2 мс) реагировать на изменения реактивной мощности на нагрузке и компенсировать реактивную мощность как индуктивного, так и емкостного характера, что помогает увеличить пропускную способность сети, а также уменьшать коэффициент нелинейных искажений.

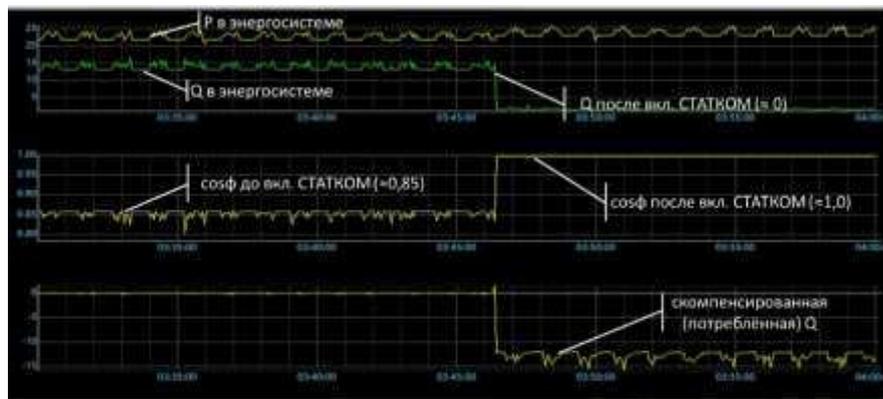


Рис. 1. Испытание параллельного режима работы ДЭС и СНЭ

На рисунке 1 показано испытание параллельного режима работы дизельной электрической станции (ДЭС) совместно со СНЭ в составе солнечно-дизельной электрической станции в Забайкальском крае. Во многих

исследовательских работах было показано, что СНЭ играет ключевую роль в режимно-балансном управлении автономных систем электроснабжения в том числе с возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ) [1, 2]. Однако, на практике, путём интеграции СНЭ был натурно испытан параллельный режим работы ДЭС и СНЭ, при котором удалось достичь плавную передачу 65 %-го наброса мощности на ДЭС, тем самым значительно ограничивая скорость набросов и спадов активной мощности нагрузки. Функциональные и режимные возможности СНЭ реализуются главным образом благодаря программно-аппаратному уровню двунаправленных силовых преобразователей тока. Силовые преобразователи оснащаются интеллектуальными управляющими алгоритмами, которые оптимизируют передачу мощности и обеспечивают плавное регулирование параметров. Эти алгоритмы учитывают текущую нагрузку, состояние источников и требования к энергосистеме. Локальная система управления СНЭ или иные автоматизированные системы мониторинга и управления непрерывно анализируют текущую нагрузку, состояние генераторов и уровень заряда СНЭ. На основе этих данных принимаются решения о распределении мощности между источниками и потребителями.

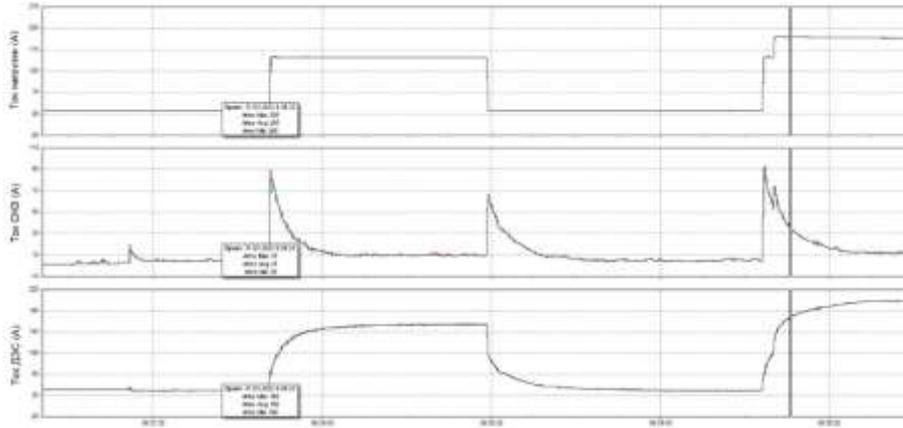


Рис. 2. Испытание функции компенсации реактивной мощности СТАТКОМ

На рисунке 2 демонстрируется функция компенсации реактивной мощности в энергосистеме за счёт применения СТАТКОМ. Так, если напряжение тонкоплёночных конденсаторов звена постоянного тока увеличивается по сравнению с его номинальным значением, СТАТКОМ генерирует ёмкостной ток (условно, генерирует реактивную мощность). Если напряжение тонкоплёночных конденсаторов постоянного тока падает ниже номинального значения, СТАТКОМ генерирует индуктивный ток (условно, потребляет реактивную мощность). СТАТКОМ, подключаемый к энергосистеме параллельно через токоограничивающий реактор, способен быстро компенсировать реактивную мощность в точке как можно ближе к её источнику. Основное преимущество СТАТКОМ в сравнении со СНЭ – меньшая удельная стоимость. В частности, СТАТКОМ не включает в свой состав литиевые батарейные модули, являющиеся самым дорогим элементом системы СНЭ, но компонентно СТАТКОМ также имеет в своём составе силовые преобразовательные модули с IGBT-элементами. Преобразовательная система реализована на базе модульного многоуровневого инвертора, что обеспечивает возможность подключения к сети до 35 кВ без силового трансформатора. Инверторы, имея необходимый набор конденсаторов в своём звене постоянного тока, генерируют реактивный ток как индуктивного, так и ёмкостного характера, а также обеспечивают необходимую амплитуду и фазу тока с целью компенсации гармоник. При этом устройство обеспечивает плавное и высокое быстродействие регулирования реактивной мощности. СТАТКОМ, функционально, аналогичен синхронным компенсаторам, за исключением того, что СТАТКОМ не имеет механической инерции и поэтому способен гораздо быстрее реагировать на изменение режимов системы по сравнению с синхронными компенсаторами (время реакции на изменение контролируемого параметра у синхронных машин до 10 мс) [4].

Исходя из вышесказанного, комплексные энергетические решения СНЭ и СТАТКОМ с функцией активного фильтра обладают рядом бесспорных технических преимуществ. При их использовании становится возможным планируемое развитие систем электроснабжения с генераторными установками мегаваттного класса. Применение подобных комбинаций в перспективе позволяет апробировать «гибкие» технические решения для современной и развивающейся энергетики в рамках развития общемировых трендов Microgrids и SmartGrids: автоматизированные системы управления с распределёнными измерителями и динамическим регулированием баланса мощностей, оптимизация режимов топливных генераторных установок, оптимизация капитальных и операционных издержек собственников генерации, интеграция ВИЭ, развитие сетей постоянного тока, а также объединение несинхронизированных энергосистем.

Литература

1. Chakraborty A. et al. Integrating STATCOM and battery energy storage system for power system transient stability: a review and application // *Advances in Power Electronics*. – 2012. – Т. 2012. – № 1. – С. 676010.
2. Зырянов В. М. и др. Анализ отклонений частоты, несинусоидальности и несимметрии напряжения в автономной энергосистеме нефтедобывающего предприятия // *Электроэнергия. Передача и распределение*. – 2023. – № 4 (79). – С. 44.
3. Интерфакс: [Электронный ресурс]. URL: <https://www.interfax.ru/business/919792>. (Дата обращения: 28.03.2024).

4. Пашкин И. А. и др. Компенсация реактивной мощности в энергосистеме путём применения статического синхронного компенсатора реактивной мощности СТАТКОМ // Современная школа России. Вопросы модернизации. – 2022. – № 3-1. – С. 31.

УЛУЧШЕНИЕ ПРОЦЕССОВ СЖИГАНИЯ БЕДНЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТАНОВОГО ГАЗОГИДРАТА

Нагибин П.С.

Научный руководитель доцент Н.Е. Шлегель

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Введение. Газовый гидрат представляет собой твердое кристаллическое вещество, в котором молекулы газа захвачены молекулами воды в ледоподобном каркасе с водородными связями [1]. Хранение и транспортировка природного газа в виде гидрата обладает высокой плотностью и при этом безопасными, надежными, экологичными и экономичными преимуществами [2]. Предполагается, что гидрат природного газа потенциально может стать экологически чистой энергетической альтернативой ископаемому топливу из-за его высокой плотности энергии [3]. Однако сжигание гидрата в чистом виде является не эффективным, за счет множественных фазовых изменений. Предложена метод совместного сжигания газового гидрата совместно с низкосортными отходами угольной промышленности. Такой метод позволит снизить время задержки зажигания, за счет чего обеспечится большая полнота выгорания такого топлива. Учитывая высокий энергетический и экономический потенциалы данного метода, следует провести комплексное исследование характеристик совместного сжигания газового гидрата с отходами угольной промышленности.

Настоящая работа направлена на экспериментальное исследование характеристик совместного сжигания гидрата и отходов угольной промышленности, а также на сравнение гидратного газа с чистым метаном.

Экспериментальное исследование. Схема экспериментального стенда, используемого для определения характеристик совместного сжигания гидрата и отходов угольной промышленности, представлена на рисунке 1. В качестве отходов угольной промышленности использовался шлам коксующегося каменного угля. Помимо угольного шлама использовался коксующийся каменный уголь.

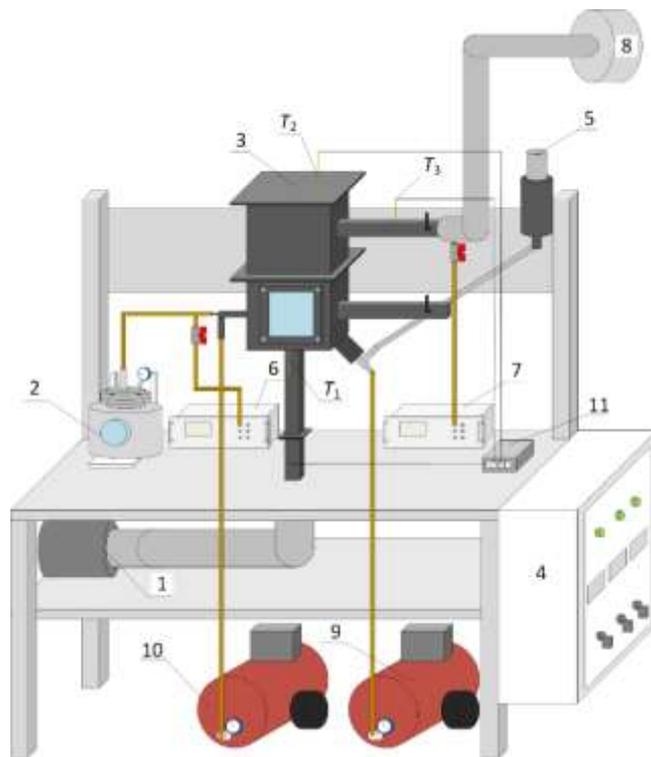


Рис. 1. Экспериментальный стенд: 1 – дутьевой вентилятор; 2 – блок диссоциации; 3 – камера сгорания; 4 – щит управления; 5 – емкость пылевидного топлива с вибромотором; 6 и 7 – газоанализаторы; 8 – дымосос; 9 и 10 – компрессоры; 11 – измерительный преобразователь; T1, T2 и T3 – места установки термопар

На рисунке 2 представлены значения температур в камере сгорания при совместном сжигании метана и гидратного газа с угольным шламом и углем. Анализ экспериментальных данных позволил установить, что температура факела гидратного газа ниже, чем у метана практически 5-10 %. Такой эффект обусловлен наличием водяного пара в топливовоздушной смеси, на нагрев которого уходит часть тепловой энергии. Кратковременное повышение температуры до 800 °С обусловлено концентрированием факела на рабочем спале термопары.